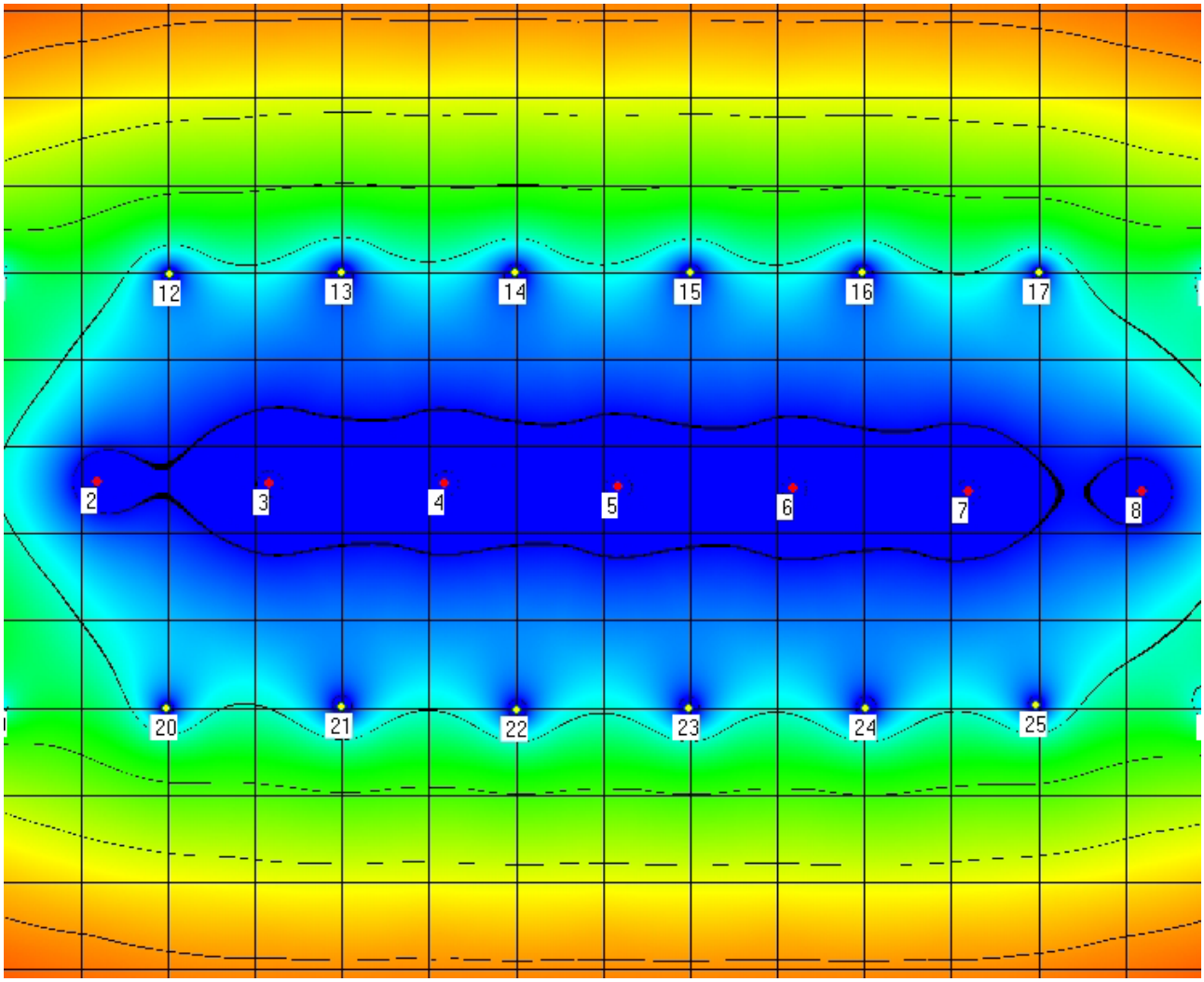
Benutzerhandbuch zum

Programm EWS

Version 5.0

Berechnung von Erdwärmesonden



Arthur Huber

März 2015

Huber Energietechnik AG
Ingenieur- und Planungsbüro
Jupiterstrasse 26, CH-8032 Zürich
Tel. +41 44 227 79 78 Fax +41 44 227 79 79
http://www.hetag.ch Email: mail@hetag.ch

Inhaltsverzeichnis

1 Bedienungsanleitung zum Programm EWS 4
1.1 Inhalt und Zweck des Programms EWS 4
1.2 Was ist neu in der Version 5.0 4
1.3 Weiterführende Literatur 4
2 Installation und Lizenzierung 5
2.1 Systemanforderungen 5
2.2 Programm - Auslieferung 5
2.3 Sprach - Versionen 5
2.4 Programm - Lizenzen 5
2.5 Installation 6
2.6 Eingabe der Lizenznummer 6
3 Dateneingabe 8
3.1 Grundsätze der Dateneingabe 8
3.1.1 Fehlende Datei „Lizenz.ews“ 8
3.1.2 Dezimal-Punkte 8
3.1.3 Default-Werte 8
3.1.4 Pull-Down Menüs 8
3.2 Blatt "Sonden" 9
3.2.1 Auswahl des Sondentyps 10
3.2.2 Bezeichnungen an der Doppel-U-Sonde 10
3.2.3 Bezeichnungen an der Koaxialsonde 11
3.2.4 Auswahl der Sondenanordnung (Einzelsonden und Sondenfelder) 12
3.2.5 Eingabe eigener g-functions 14
3.3 Beliebige Sondenfelder: Blatt „Sondenanordnung“ 16
3.3.1 Setzen, verschieben und löschen von Erdsonden im Sondenfeld 17
3.3.2 Optimieren von Sondenfeldern 18
3.3.3 Berechnung Einzelsonde im Sondenfeld 18
3.3.4 Einfügen von Karten im Hintergrund in 4 Schritten: 19
3.3.5 Nachbarsonden und neue Sondendarstellung in der Pro-Version 20
3.3.6 Darstellung der Bodentemperaturen in der Pro-Version 21

3.4 Blatt "Sole" ... 22
3.4.1 Eingabe der unbeeinflussten Erdreichtemperaturen ... 23
3.4.2 Automatische Berechnung der notwendigen Sondenlänge ... 24
3.5 Blatt "Info" ... 24
3.6 Blatt "Erde" ... 25
3.6.1 Grundeingaben ... 25
3.6.2 Eingabe mehrerer horizontaler Schichten ... 27
3.6.3 Eingabe der Stoffwerte für die Erde ... 29
3.6.4 Erstellen einer eigenen Bibliothek von Stoffwerten ... 30
3.7 Blatt "Entzug" ... 31
3.8 Blatt "Lastprofil" ... 33
3.9 Blatt "Simulation" ... 35
3.9.1 Einblenden des Blattes “Simulation” ... 35
3.9.2 Eingabe von Entzugsleistungen oder Sonden-Rücklauftemperaturen ... 36
3.9.3 Aktive Zusatzkühlung wenn das Sonden-Freecooling nicht ausreicht ... 36
3.9.4 Serieschaltung von Erdwärmesonden oder Energiepfählen ... 36
3.9.5 Frostschutz (minimale Sondentemperatur) und bivalente Anlagen ... 36
3.9.6 Response - Test ... 36
3.10 Blatt „Wasser“ (Grundwassereinfluss) ... 38
3.11 Blatt „Kollektoren“ (solare Sondenregeneration) ... 40
3.12 Blatt "Druck" ... 42
3.13 Blatt "Parameter" ... 44
3.14 Wärmepumpenkenngrössen und Zusatzheizung ... 45
3.15 Direktkühlung ... 46
4 Beispielsammlung ... 48
4.1 Aufruf und Laden der Beispiele ... 48
4.2 Im Programm enthaltene Rechenbeispiele: ... 48
5 Berechnung ... 51
5.1 Graphische Darstellung von Quellen- und Rücklauftemperatur ... 51
5.2 Graphische Darstellung der Entzugsleistung ... 51
5.3 Temperaturverlauf über ganze Simulationsperiode ... 52
5.4 Darstellung ganzer Jahresverlauf (letztes Simulationsjahr) ... 53
5.5 Resultatblatt ... 53

6 ANHANG A: Modellbeschrieb 54
6.1 Simulationsbereich 54
6.1.1 Simulation des Zeitschrittes 55
6.2 Rechengitter 56
6.3 Wärmeleitungsgleichung und Sprungantwort g 57
6.3.1 Wärmeleitungsgleichung 57
6.3.2 Der radiale Temperatur-Trichter 57
6.3.3 Dimensionslose Temperatursprungantwort g 58
6.3.4 Vergleich der Modelle 59
6.4 Die Berechnung der g-functions mit dem Superpositionsprinzip 60
6.5 Die Berücksichtigung von Nachbarsonden 60
6.6 Geothermischer Wärmefluss und Temperaturgradient 61
6.7 Die Bohrlochtemperatur T_b und die Fluidtemperatur T_f 61
6.7.1 Die Fluidtemperatur T_f 62
6.8 Thermische Widerstände Ra und Rb in der Doppel-U-Sonde 62
6.8.1 Internen Bohrlochwiderstandes R_a nach Hellström [4] 63
6.8.2 Bohrlochwiderstandes R_b nach Hellström [4] 63
6.9 Thermische Widerstände Ra / Rb an der Koaxialsonde 64
6.9.1 Modellierung des internen Bohrlochwiderstandes R_a 64
6.9.2 Modellierung des Bohrlochwiderstandes R_b 64
6.10 Wärmeleistung der Grundwasserströmung 64
6.11 Analytische Erdsondengleichung 65
6.11.1 Konzept der thermischen Widerstände 65
6.11.2 thermische Verbraucherwiderstand R_f 65
6.11.3 Thermischer Transportwiderstand R_m 66
6.11.4 Wärmewiderstand des Bodens R_g 67
6.11.5 Analytische Erdwärmesondengleichung 67
7 ANHANG B: Eingabe eigener g-functions 68
7.1 Beispiel 1: Eingabe einer g-function mittels den Funktionswerten 68
8 Symbolverzeichnis 70
8.1 Lateinische Symbole 70
8.2 Griechische Symbole 71
9 Literaturverzeichnis 72

1 Bedienungsanleitung zum Programm EWS

1.1 Inhalt und Zweck des Programms EWS

Das Programms EWS berechnet in der Grundversion das thermische Verhalten von Erdwärmesonden. Dazu wird die Wärmeleitungsgleichung im Erdreich und der Wärmetransport aus der Sonde numerisch gelöst. Das Programm berechnet die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen, sowie die Entzugsleistungen von Erdwärmesonden (Einzelsonden und Sondenfelder) auf stündlicher Basis über eine Zeitdauer von bis zu 200 Jahren. Dabei können alle wichtigen Einfluss-Faktoren berücksichtigt werden. Das Erdreich kann vertikal in bis zu 10 verschieden Schichten mit unterschiedlichen, physikalischen Eigenschaften des Erdreichs und der Hinterfüllung aufgeteilt werden. Mit der Möglichkeit, das Sondenfluid auch instationär rechnen zu können, sind auch der Anfahrprozess und Thermal-Response-Tests berechenbar.

In der Vollversion sind grafische Eingaben von Sondenfeldern auf eingelesenen Plänen (Katasterpläne, Grundrisspläne, Quartierpläne) möglich und es können ganze Systeme zur Direktkühlung über Erdwärmesonden berechnet werden. Ausgehend von der Rücklauftemperatur des Gebäude-Kühlsystems (TABS, Kühldecken und Lüftung) kann eine hydraulische Einkopplung der Sonden mit Wärmetauschern zur Lüftung und zum hydraulischen Kühlsystem simuliert werden. Bei der Lüftung ist selbst ein komplizierter Lüftungsfahrplan kein Problem.

In der „Professional Version“ (Pro-Version) können zusätzlich Grundwassereinfluss, Sonnenkollektoren und Nachbarsonden berücksichtigt werden.

1.2 Was ist neu in der Version 5.0

In der Version 5.0 wurden unter anderem die folgenden Neuerungen realisiert:

- Freie Sondenanordnung für bis zu 150 Sonden (Vollversion) / 600 Sonden (Pro-Version)
- Neue, verkleinerte Sondendarstellung mit Gitternetzen von 5m – 50m zur Darstellung ganzer Quartiere auf Originalpläne (Pro-Version)
- Berücksichtigung von Nachbarsonden (Pro-Version)
- Darstellung der Bodentemperaturen für Sondenfelder und ganzer Quartiere (Pro-Version)
- Darstellung der Sondentemperaturen über ganzes Jahr und über ganze Simulationsdauer
- Grundwassereinflusses von 1 oder 2 grundwasserführenden Schichten (Pro-Version)
- Solare Sondenregeneration mit thermischen Sonnenkollektoren (Pro-Version)

1.3 Weiterführende Literatur

Bei der Ausarbeitung des Programms EWS wurde grosser Wert darauf gelegt, dass das Verhalten von Erdwärmesonden auch von Benutzern des Programms berechnet werden kann, die keinen tieferen Einblick in die Modelle und die numerischen Zusammenhänge haben. Dazu wurde z.B. jedem Eingabewert ein Defaultwert (Standard-Eingabewerte) zur Seite gestellt, der in den meisten Fällen zu brauchbaren Resultaten führt. Im vorliegenden Handbuch wurde darauf verzichtet, alle verwendeten Modelle zu dokumentieren. Diese Modelle sind aber in wissenschaftlichen Forschungsberichten (inkl. Validierung) sehr detailliert (teilweise inkl. Quell-Code der Programm-Teile) publiziert. Im Literaturverzeichnis ist ein Überblick über diese Forschungsberichte zu finden.

Im Programm EWS wurde das Programm-Modul EWS eingebaut, das im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE) in Bern entwickelt wurde (cf. Literatur [5], [6], [8])

2 Installation und Lizenzierung

2.1 Systemanforderungen

Für einen sinnvollen Einsatz des Programms EWS sind die folgenden Randbedingungen auf Ihrem PC erforderlich:

- Betriebssystem: Windows XP / Windows Vista / Windows 7 / Windows 8
- mindestens 100 MB freier Speicherplatz
- Bildschirmauflösung: mindestens 1024 x 768 Pixel

2.2 Programm - Auslieferung

Das Programm EWS wird aus rechtlichen Gründen nicht physikalisch auf einem Datenträger ausgeliefert. Es kann nur aus dem Internet heruntergeladen oder per Email zugestellt und mit einer Lizenznummer freigeschaltet werden.

2.3 Sprach - Versionen

Das Programm EWS ist in verschiedenen Sprachversionen erhältlich (deutsch, französisch, italienisch, spanisch, englisch). Soll das Programm EWS in einer anderen Sprachversion als deutsch geladen werden, so muss sich die Übersetzungsdatei „Sprache.ews“ im gleichen Datei-Ordner befinden wie das Programm „Ews.exe“. Ausserdem kann das Programm EWS auch jederzeit über die Menü-Zeile Info auf eine andere Sprachversion umgeschaltet werden.

2.4 Programm - Lizenzen

Der Erwerb einer Programm-Lizenz berechtigt zur Installation des Programms EWS auf einem Rechner des Kunden. Wird der Rechner ausschliesslich durch eine Person genutzt, so kann diese für einen Zweit-Arbeitsplatz (z.B. Laptop oder Heim-PC) ohne Aufpreis eine zweite Lizenznummer erhalten. Beim Kauf eines Ersatz-PCs kann zusätzlich eine dritte Lizenznummer beantragt werden.

Für alle übrigen Fälle sind für Zusatz-Installationen weitere Programm-Lizenzen zu erwerben. Bei Zusatz-Lizenzen des gleichen Kunden wird ein Preisnachlass von 50% gewährt.

Programm-Lizenzen sind nicht übertragbar und können nicht weiterverkauft werden.

Für Schulen gelten besondere Bestimmungen. Schul-Lizenzen dürfen nicht für kommerzielle Berechnungen eingesetzt werden.

2.5 Installation

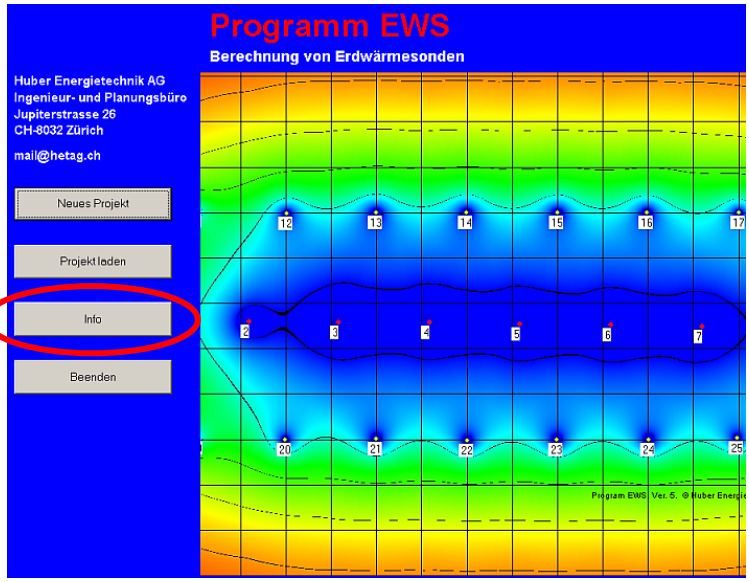
Für das Programm EWS ist keine Installation erforderlich. Ein einfaches Kopieren des Files Ews.exe in den gewünschten Zielordner genügt. Das Programm wird sodann durch die Eingabe einer Lizenznummer freigeschaltet. Dabei wird zwischen 4 Arten von Lizenznummern unterschieden:

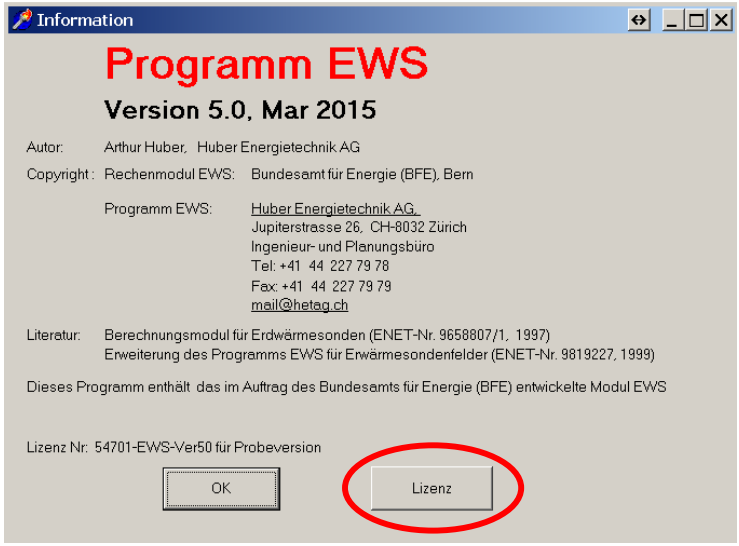
1. Lizenznummer für Testversion (4701)
2. Lizenznummer für Grundversion
3. Lizenznummer für Vollversion
4. Lizenznummer für die Pro-Version

Je nach Eingabe der Lizenznummer stehen ein unterschiedlicher Funktionsumfang zur Verfügung.

2.6 Eingabe der Lizenznummer

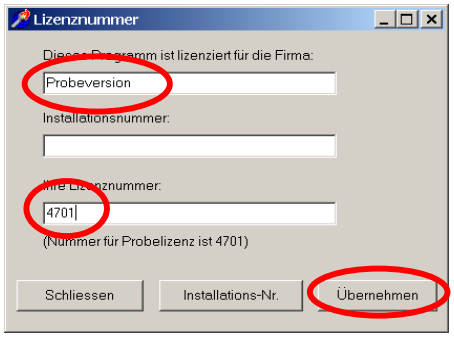
Sowohl die Testversion, als auch die Grund- und Vollversion müssen durch die Eingabe einer Lizenznummer freigeschaltet werden. Nachfolgend ist das Vorgehen dazu beschrieben:




Information
Programm EWS
Version 5.0, Mar 2015
Autor: Arthur Huber, Huber Energietechnik AG
Copyright: Rechenmodul EWS: Bundesamt für Energie (BFE), Bern
Programm EWS: Huber Energietechnik AG,
Jupiterstrasse 26, CH-8032 Zürich
Ingenieur- und Planungsbüro
Tel: +41 44 227 79 78
Fax: +41 44 227 79 79
mail@hetag.ch
Literatur: Berechnungsmodul für Erdwärmesonden (ENET-Nr. 9658807/1, 1997)
Erweiterung des Programms EWS für Erwärmesondenfelder (ENET-Nr. 9819227, 1999)
Dieses Programm enthält das im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE) entwickelte Modul EWS
Lizenz Nr: 54701-EWS-Ver50 für Probeversion
OK
Lizenz

Testversion:

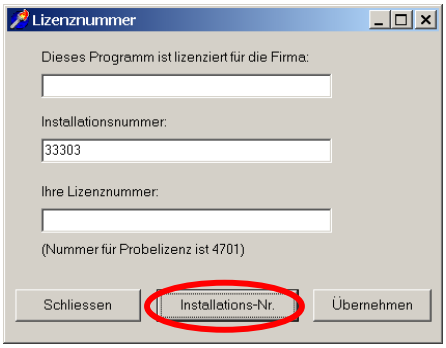
Um die Testversion freizuschalten, muss anstelle der Firma das Wort „**Probeversion**“ eingegeben werden. Die Lizenznummer der Testversion ist **4701**.



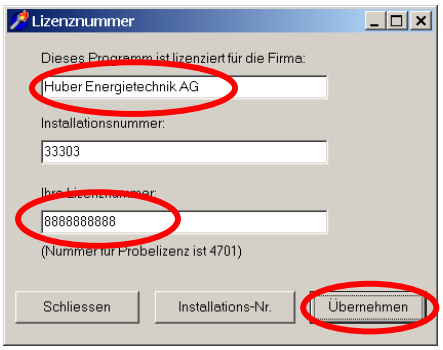
Mit der Testversion steht nun jedermann der Funktionsumfang der Vollversion offen, wobei allerdings einzelne Eingabefelder (z.B. Sondenlänge und Stoffwerte) nicht verändert werden können.

Grund- Voll- und Pro-Version:

Durch drücken des Buttons „Installations-Nr.“ wird nun die Installationsnummer angezeigt. Diese Installationsnummer ist eine rechnerspezifische Grösse und hat für jeden PC einen anderen Wert. Diese Nummer ist nun zusammen mit dem Firmennamen per Mail an ***mail@hetag.ch*** zu senden. In der Regel wird dann innert 48h die individuelle Lizenznummer zurückgeschickt.



Die Lizenznummer ist nun zusammen mit dem Firmennamen in den dafür vorgesehenen Feldern einzutragen. Bewahren Sie die Lizenznummer sorgfältig auf, es kann notwendig werden, diese nach dem Ablauf einer gewissen Zeit nochmals einzugeben.



Nach Beendigung der Installation muss mit dem Programm einmal ein Berechnungs-Run mit den unveränderten Default-Werten durchgeführt werden. Erst danach kann mit der Dateneingabe fortgefahren werden.

3 Dateneingabe

3.1 Grundsätze der Dateneingabe

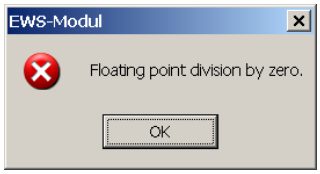
3.1.1 Fehlende Datei „Lizenz.ews“

Erscheint beim Aufstarten des Programms die folgende Fehlermeldung, so wurde die Lizenznummer noch nicht eingetragen (cf. Kapitel 2.6)

Haben Sie die Lizenznummer bereits früher eingetragen und die Fehlermeldung erscheint trotzdem, so überprüfen Sie, ob die Datei „Lizenz.ews“ sich im gleichen Ordner befindet wie das Programm „Ews.exe“. Falls dies nicht der Fall ist, so kopieren Sie die Datei „Lizenz.ews“ in den aktuellen Ordner oder geben Sie die Lizenznummer gemäss Kapitel 2.6 erneut ein.

3.1.2 Dezimal-Punkte

Es ist streng darauf zu achten, dass bei Eingaben nie ein Dezimal-Komma, sondern immer ein Dezimal-Punkt verwendet wird. Bei der Eingabe von Dezimal-Kommas werden alle Eingaben nach dem Komma ignoriert, was zu einer Fehlermeldung „Floating point division by zero“ führen kann.



3.1.3 Default-Werte

Allen Simulations-Parametern ist beim Aufstarten des Programms ein Standard-Wert („Default-Wert“) zugeordnet. Bei all diesen Default-Werten wurde darauf geachtet, möglichst gebräuchliche und realistische Werte zuzuordnen. Wenn ein Simulationsparameter nicht bekannt sein sollte, oder der Sinn eines solchen unklar ist, so kann in der Regel mit dem Default-Wert gearbeitet werden.

3.1.4 Pull-Down Menüs

An verschiedenen Stellen sind Pull-Down Menüs als Hilfe für zur Dateneingaben vorhanden. Bei der Anwahl eines solchen Pull-Down Menüs werden in der Regel mehrere Eingabeparameter auf die dazu passenden Werte gesetzt. Dabei ist zu beachten, dass diese veränderten Eingabeparameter nachträglich trotzdem noch von Hand verändert werden können. In dem Fall kann es vorkommen, dass die Pull-Downs nicht mehr mit den dazugehörenden Eingabefeldern übereinstimmen. Bei einem solchen „Widerspruch“ rechnet das Programm EWS grundsätzlich mit den von Hand gesetzten Werten in den Eingabefeldern und ignoriert die Pull-Down-Auswahl.

➔ **Das Programm EWS rechnet grundsätzlich nicht mit den Angaben der Pull-Down-Auswahlfeldern, sondern immer mit den dazu gehörenden Eingabefeldern, die in jedem Fall unabhängig von den Pull-Down Menüs eingestellt werden können.**

3.2 Blatt "Sonden"

Im Blatt "Sonden" werden die Sondenanzahl, die Bohrtiefe H, die Sondenart und die Sondenanordnung definiert.

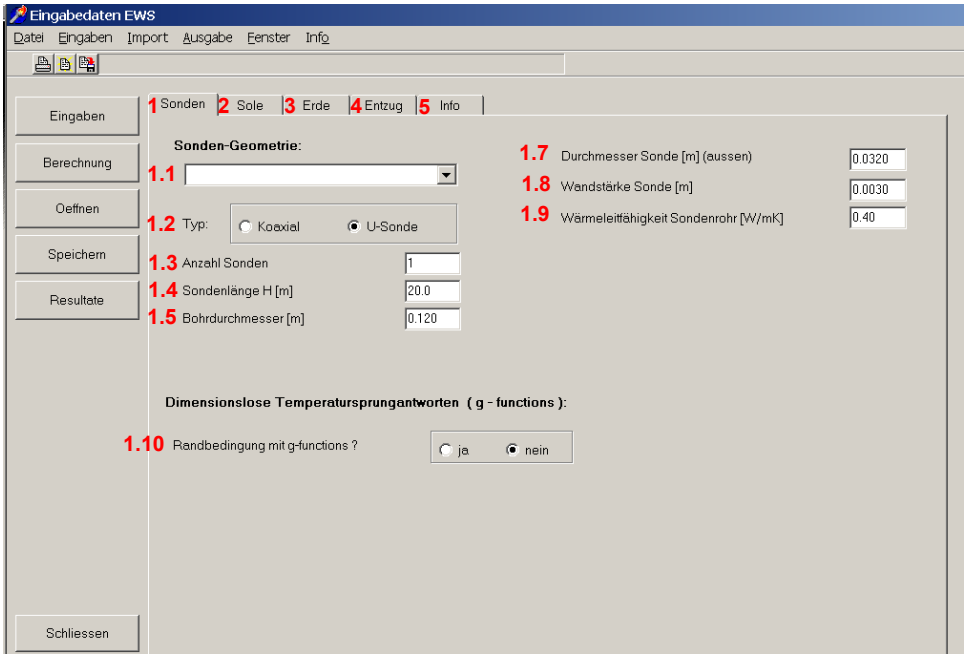


Abb. 3.1: Blatt "Sonden" mit den Default-Einstellungen.

Im Feld 1.4 wird die Bohrtiefe H, im Feld 1.3 die Anzahl der Sonden eingegeben. Werden im Feld 1.3 mehr als eine Sonde eingegeben, so erscheinen zusätzliche Eingabefelder (cf. Abb. 3.2). Nun ist im Feld 1.6 auch der Sondenabstand B einzugeben und im Feld 1.11 kann die Sondenanordnung gewählt werden.

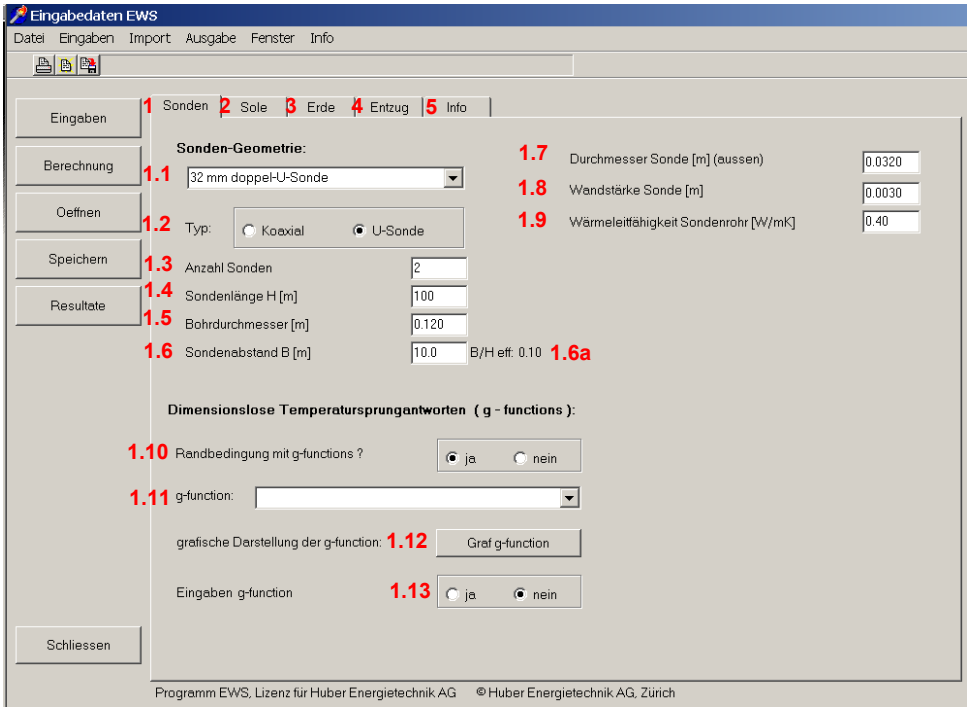

Eingabedaten EWS
Datei Eingaben Import Ausgabe Fenster Info
Eingaben
Berechnung
Oeffnen
Speichern
Resultate
Schliessen
1 Sonden 2 Sole 3 Erde 4 Entzug 5 Info
Sonden-Geometrie:
1.1 32 mm doppel-U-Sonde
1.2 Typ: Koaxial U-Sonde
1.3 Anzahl Sonden 2
1.4 Sondenlänge H [m] 100
1.5 Bohrdurchmesser [m] 0.120
1.6 Sondenabstand B [m] 10.0 B/H eff: 0.10 1.6a
1.7 Durchmesser Sonde [m] (aussen) 0.0320
1.8 Wandstärke Sonde [m] 0.0030
1.9 Wärmeleitfähigkeit Sondenrohr [W/mK] 0.40
Dimensionslose Temperatursprungantworten (g - functions):
1.10 Randbedingung mit g-functions ? ja nein
1.11 g-function:
grafische Darstellung der g-function: 1.12 Graf g-function
Eingaben g-function 1.13 ja nein
Programm EWS, Lizenz für Huber Energietechnik AG © Huber Energietechnik AG, Zürich

Abb. 3.2: Blatt "Sonden", zusätzliche Auswahlfelder bei 2 oder mehr Sonden auf Feld 1.3.

3.2.1 Auswahl des Sondentyps

Durch die Auswahl im Pull-Down-Feld 1.1 (cf Abb. 3.3) werden Default-Werte zum Sondentyp (U- oder Koaxialsonden, Feld 1.2), Bohrdurchmesser [2 x r_1] (Feld 1.5), Durchmesser der Sondenrohre [2 x r_s] (Feld 1.7), Wandstärke [r_s-r_o] (Feld 1.8) und Wärmeleitfähigkeit λ_s der Sondenrohre (Feld 1.9) automatisch eingefüllt. Diese Parameter können allerdings auch noch von Hand angepasst werden.

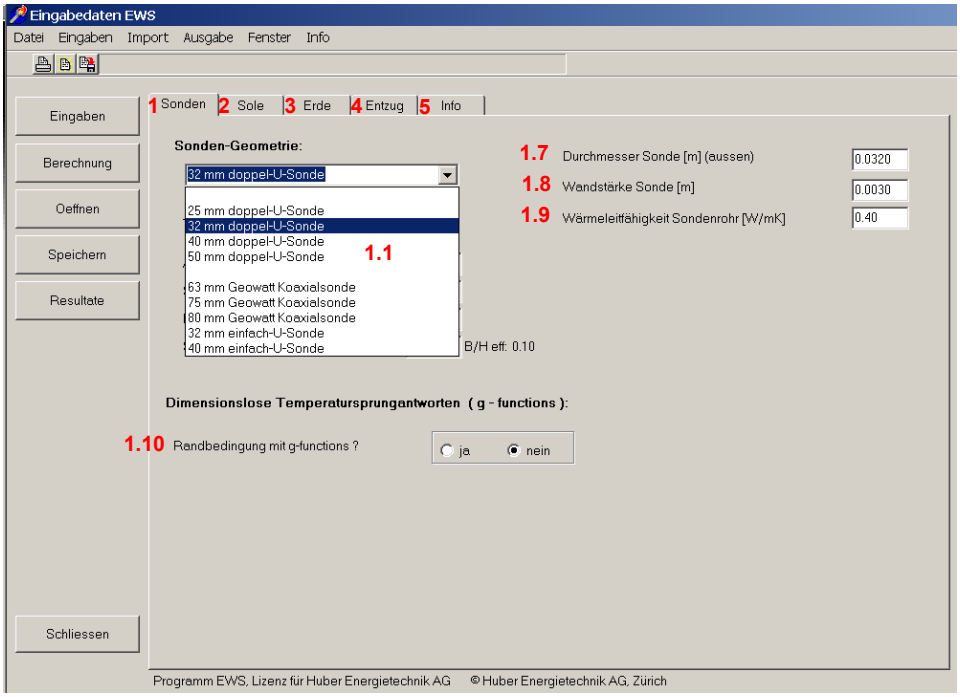
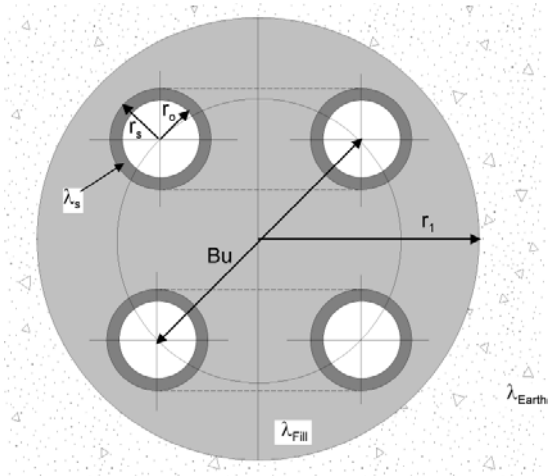


Abb. 3.3: Blatt "Sonden", Auswahl des Sondentyps unter Feld 1.1.

Gerade beim Bohrdurchmesser können je nach Bohrfirma und Bohrgrund grössere Abweichungen von den Default-Werten vorkommen. Eine Überprüfung des Bohrdurchmessers (Feld 1.5) ist daher angezeigt.

3.2.2 Bezeichnungen an der Doppel-U-Sonde



Die Sondengeometrie kann wie folgt eingegeben werden:

Feld 1.5	Bohrdurchmesser = 2 x r_1
Feld 1.7	Durchmesser Sonde aussen = 2 x r_s
Feld 1.8	Wandstärke Sonde = r_s – r_o
Feld 1.9	Wärmeleitfähigkeit Sondenrohre λ_s
Feld 3.11	Rohrabstand „shank spacing“ = Bu
Feld 3.3	Wärmeleitfähigkeit Hinterfüllung λ_{Fill}

Abb. 3.4: Bezeichnungen an der Doppel-U-Sonde.

3.2.3 Bezeichnungen an der Koaxialsonde

Durch die Auswahl des koaxialen Sondentyps (Feld 1.2) erscheinen die für die Koaxialsonde zusätzlichen Eingabefelder 1.22, 1.23 und 1.24 (Angaben zum koaxialen Innenrohr):

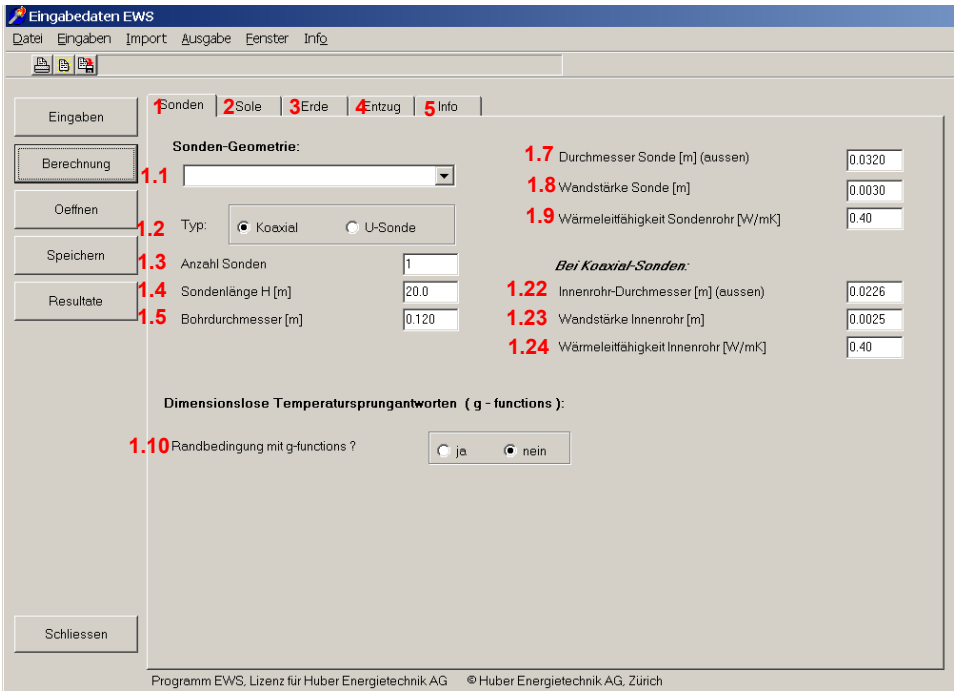
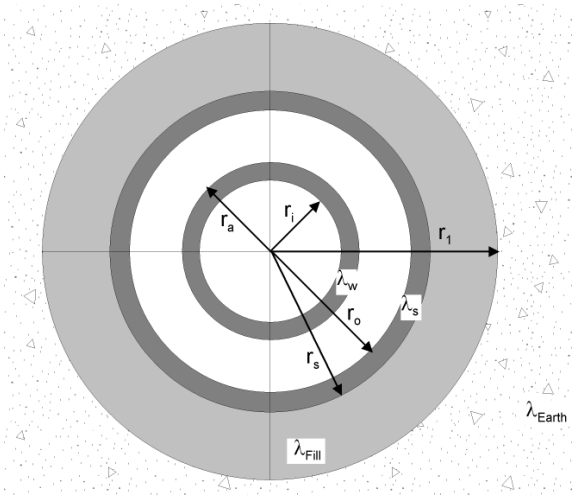

Eingabedaten EWS
Datei Eingaben Import Ausgabe Fenster Info
Eingaben
Berechnung
Oeffnen
Speichern
Resultate
Schliessen
1 Sonden 2 Sole 3 Erde 4 Entzug 5 Info
Sonden-Geometrie:
1.1
1.2 Typ: Koaxial U-Sonde
1.3 Anzahl Sonden 1
1.4 Sondenlänge H [m] 20.0
1.5 Bohrdurchmesser [m] 0.120
1.7 Durchmesser Sonde [m] (aussen) 0.0320
1.8 Wandstärke Sonde [m] 0.0030
1.9 Wärmeleitfähigkeit Sondenrohr [W/mK] 0.40
Bei Koaxial-Sonden:
1.22 Innenrohr-Durchmesser [m] (aussen) 0.0226
1.23 Wandstärke Innenrohr [m] 0.0025
1.24 Wärmeleitfähigkeit Innenrohr [W/mK] 0.40
Dimensionslose Temperatursprungantworten (g - functions):
1.10 Randbedingung mit g-functions ? ja nein
Programm EWS, Lizenz für Huber Energietechnik AG © Huber Energietechnik AG, Zürich

Abb. 3.5: Blatt "Sonden", Auswahl der Koaxialsonde in Feld 1.2.



Die Sondengeometrie kann wie folgt eingegeben werden:

Feld 1.5	Bohrdurchmesser = 2 x r_1
Feld 1.7	Durchmesser Sonde aussen = 2 x r_s
Feld 1.8	Wandstärke Sonde = $r_s - r_o$
Feld 1.9	Wärmeleitfähigkeit Sondenrohre λ_s
Feld 1.22	Innenrohr-Durchmesser aussen = 2 x r_a
Feld 1.23	Wandstärke Innenrohr = $r_a - r_i$
Feld 1.24	Wärmeleitfähigkeit Innenrohre λ_w
Feld 3.3	Wärmeleitfähigkeit Hinterfüllung λ_{Fill}

Abb. 3.6: Bezeichnungen an der Koaxialsonde.

3.2.4 Auswahl der Sondenanordnung (Einzelsonden und Sondenfelder)

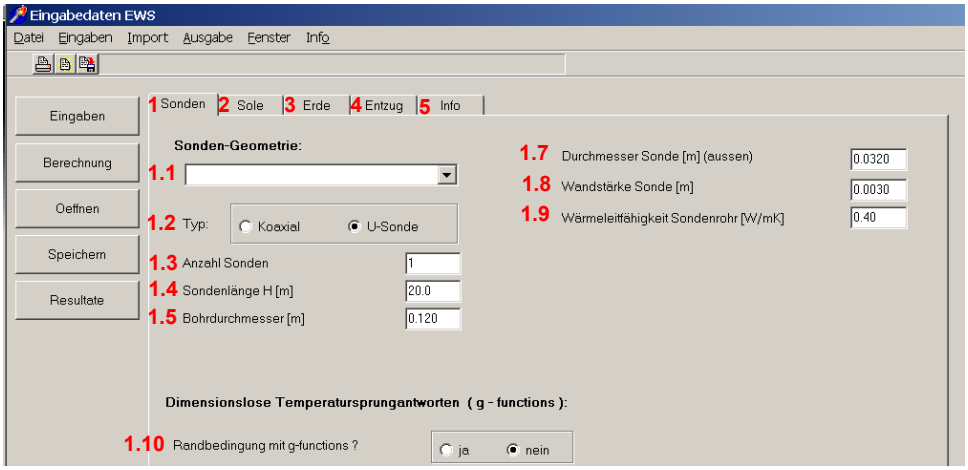


Abb. 3.7: Blatt "Sonden" mit den Default-Einstellungen.

Jede Sondenanordnung kann durch ihre dimensionslose Temperatur-Sprungantwort (= g-function, cf. Gl. 6.8) beschrieben werden. Diese wird im Programm EWS als äussere Randbedingung für das Simulationsgebiet eingesetzt. Für Einzelsonden kann alternativ dazu die analytische Lösung für unendliche Linienquellen von Carslaw & Jaeger [1] gemäss Gl. 6.11 eingesetzt werden. Dies wird im Feld 1.10 bestimmt. Wird dieses Feld auf „ja“ gesetzt, so werden die g-functions als Randbedingung zur Bestimmung der Sondenanordnung verwendet, anderenfalls wird der Ansatz von Carslaw & Jaeger verwendet. Diese Randbedingung ist allerdings nur für Einzelsonden für Simulationszeiträume bis zur Sondenzeitkonstanten Gl. 6.12 geeignet.

Sobald in Feld 1.3 mehr als eine Sonde angewählt wird, wird das Feld 1.10 auf „ja“ gesetzt und die Randbedingungen werden mit den g-functions von Eskilson ([2] und [3]) berechnet. Nun erscheint das Pull-Down-Feld 1.11 mit einer Auswahl an Sondenanordnungen. Dabei bedeutet B/H das Verhältnis von Sondenabstand B zu Sondentiefe H.

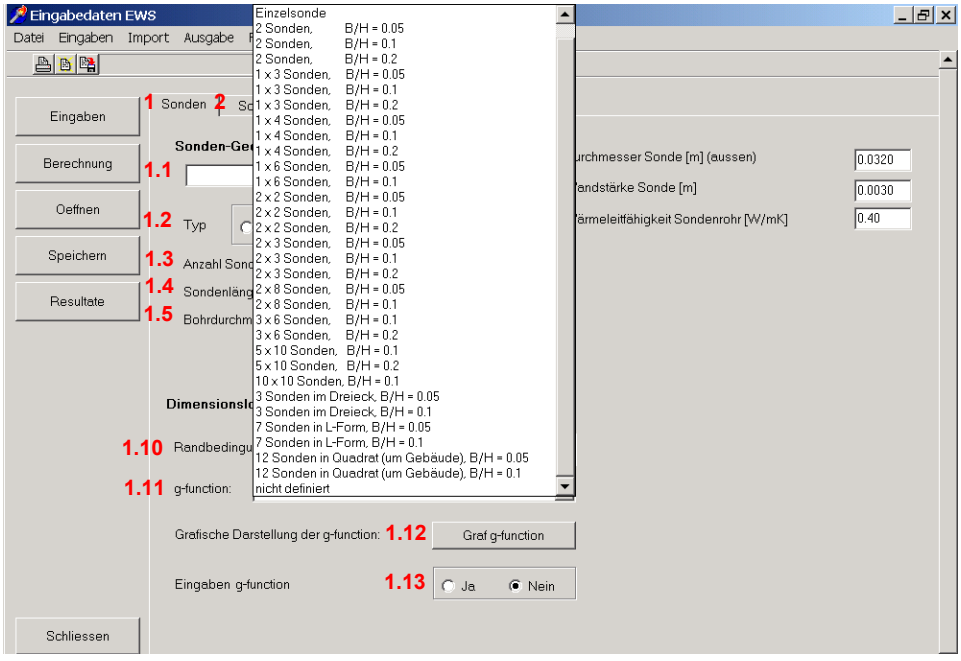
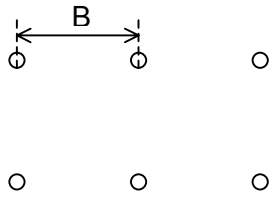
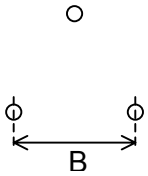
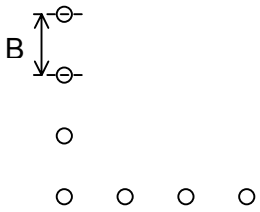
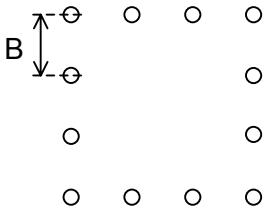
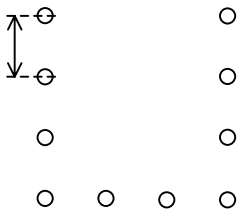

Eingabedaten EWS
Einzelsonde
2 Sonden, B/H = 0.05
2 Sonden, B/H = 0.1
2 Sonden, B/H = 0.2
1 x 3 Sonden, B/H = 0.05
1 x 3 Sonden, B/H = 0.1
1 x 3 Sonden, B/H = 0.2
1 x 4 Sonden, B/H = 0.05
1 x 4 Sonden, B/H = 0.1
1 x 4 Sonden, B/H = 0.2
1 x 6 Sonden, B/H = 0.05
1 x 6 Sonden, B/H = 0.1
2 x 2 Sonden, B/H = 0.05
2 x 2 Sonden, B/H = 0.1
2 x 2 Sonden, B/H = 0.2
2 x 3 Sonden, B/H = 0.05
2 x 3 Sonden, B/H = 0.1
2 x 3 Sonden, B/H = 0.2
2 x 8 Sonden, B/H = 0.05
2 x 8 Sonden, B/H = 0.1
3 x 6 Sonden, B/H = 0.1
3 x 6 Sonden, B/H = 0.2
5 x 10 Sonden, B/H = 0.1
5 x 10 Sonden, B/H = 0.2
10 x 10 Sonden, B/H = 0.1
3 Sonden im Dreieck, B/H = 0.05
3 Sonden im Dreieck, B/H = 0.1
7 Sonden in L-Form, B/H = 0.05
7 Sonden in L-Form, B/H = 0.1
12 Sonden in Quadrat (um Gebäude), B/H = 0.05
12 Sonden in Quadrat (um Gebäude), B/H = 0.1
nicht definiert
1.10
1.11 g-function:
Grafische Darstellung der g-function: 1.12 Graf g-function
Eingaben g-function 1.13 Ja Nein
Schliessen

Abb. 3.8: Blatt "Sonden", Auswahl der Sondenanordnung unter 1.11.

Die Sondenanordnungen in Feld 1.11 sind wie folgt zu verstehen:

• „Einzelsonde“:	Es wird die g-function nach Eskilson für eine einzelne Sonde verwendet.
• 1 x n Sonden, Bsp. 1 x 4 Sonden:	
• m x n Sonden, Bsp. 2 x 3 Sonden:	
• 3 Sonden im Dreieck:	
• 7 Sonden in L-Form:	
• 12 Sonden im Quadrat (um Gebäude):	
• 10 Sonden in U-Form:	
• „nicht definiert“:	Jede der Sonden wird gemäss Carslaw & Jaeger (Gl. 6.11) berechnet (einzelne unendliche Linienquelle).
• „eigene Eingabe“:	Beschreibung cf. Kap. 3.2.5.

Zu beachten ist folgendes: Auch wenn die Sondenanzahl in Feld 1.3 nicht mit der Sondenanzahl der Auswahl in Feld 1.11 übereinstimmt, so wird die Anzahl in Feld 1.3 nicht automatisch angepasst! Für die Berechnung massgebend ist immer der Wert in Feld 1.3.

Jede g-function ist immer nur für ein bestimmtes Verhältnis von Sondenabstand B zu Sondentiefe H gültig. Weicht nun das effektive Verhältnis B/H_{eff} (Feld 1.6a) vom B/H der gewählten g-function ab, so wird die gewählte g-function automatisch auf B/H_{eff} extrapoliert. Die Grundlagen dazu sind bei Huber & Pahud [6] zu finden. Da jede Extrapolation eine gewisse Unsicherheit beinhaltet, sollte bei der g-function immer diejenige ausgewählt werden, deren Verhältnis B/H am nächsten beim effektiven Wert (Feld 1.6a) liegt. Durch das Drücken des Buttons 1.12 kann nun diese extrapolierte g-function, die für die Berechnung verwendet wird, grafisch dargestellt werden.

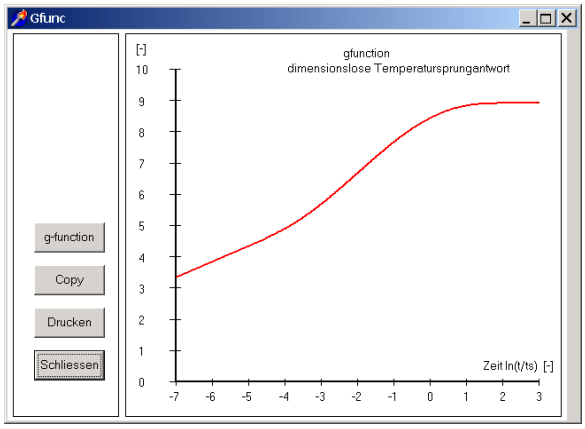


Abb. 3.9: Blatt "Sonden", grafische Darstellung der durch Extrapolation berechneten g-function.

3.2.5 Eingabe eigener g-functions

Das Programm EWS bietet als Alternative zur Wahl einer Sondenanordnung aus der Bibliothek (Feld 1.11) auch die Möglichkeit, eigene g-functions einzugeben. In der Literatur (z.B. in [3]) ist eine Vielzahl von g-functions publiziert. Weiter ist es möglich, aus den Bibliothekswerten neue g-functions zu interpolieren. Wird zum Beispiel die g-function für eine Sondenanordnung von 1 x 5 Sonden gesucht, so lässt sich diese mit genügender Genauigkeit aus den vorhandenen Bibliothekswerten für die Sondenanordnungen von 1 x 4 und 1 x 6 Sonden interpolieren.

Nachfolgend wird gezeigt, wie der Benutzer eigene g-functions-Werte eingeben kann. Dies ist nur dann notwendig, wenn die effektive Sondenanordnung mit keiner Auswahl aus Feld 1.11 beschrieben werden kann. Dazu wird im Feld 1.11 der letzte Auswahlpunkt „eigene Eingabe“ ausgewählt, dann wird bei den Feldern 1.10 und 1.13 „ja“ angewählt. Daraufhin erscheinen rechts die Felder 1.14 bis 1.21 (cf. Abb. 3.10).

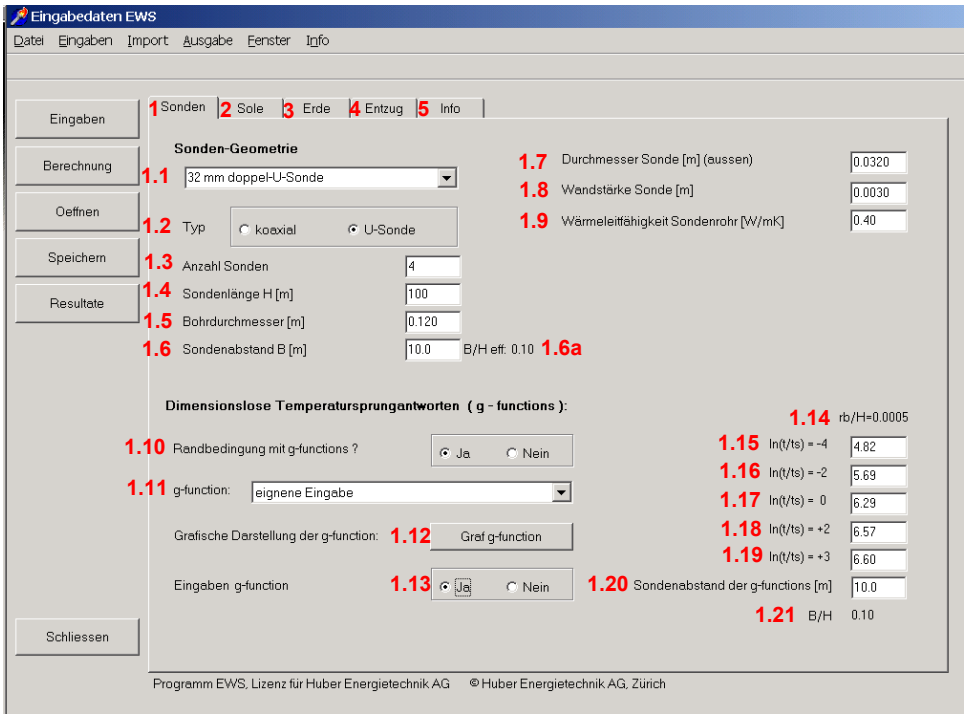

Eingabedaten EWS
Datei Eingaben Import Ausgabe Fenster Info
Eingaben
Berechnung
Oeffnen
Speichern
Resultate
Schliessen
1 Sonden 2 Sole 3 Erde 4 Entzug 5 Info
Sonden-Geometrie
1.1 32 mm doppel-U-Sonde
1.2 Typ koaxial U-Sonde
1.3 Anzahl Sonden 4
1.4 Sondenlänge H [m] 100
1.5 Bohrdurchmesser [m] 0.120
1.6 Sondenabstand B [m] 10.0 B/H eff: 0.10 1.6a
1.7 Durchmesser Sonde [m] (aussen) 0.0320
1.8 Wandstärke Sonde [m] 0.0030
1.9 Wärmeleitfähigkeit Sondenrohr [W/mK] 0.40
Dimensionslose Temperatursprungantworten (g - functions):
1.10 Randbedingung mit g-functions ? Ja Nein
1.11 g-function: eigene Eingabe
Grafische Darstellung der g-function: 1.12 Graf g-function
Eingaben g-function 1.13 Ja Nein
1.14 rb/H=0.0005
1.15 ln(t/ts) = -4 4.82
1.16 ln(t/ts) = -2 5.69
1.17 ln(t/ts) = 0 6.29
1.18 ln(t/ts) = +2 6.57
1.19 ln(t/ts) = +3 6.60
1.20 Sondenabstand der g-functions [m] 10.0
1.21 B/H 0.10
Programm EWS, Lizenz für Huber Energietechnik AG © Huber Energietechnik AG, Zürich

Abb. 3.10: Blatt "Sonden" bei Eingabe eigener g-functions.

Die Felder 1.15 bis 1.19 beschreiben die g-function mit Hilfe der Funktionswerte der g-function an den Stützstellen ln(t/ts) = -4, -2, 0, +2, +3. Publizierte oder selber berechnete g-functions gelten immer für ein bestimmtes Verhältnis B/H. Das in Feld 1.21 angezeigte Verhältnis B/H ist berechnet aus dem Sondenabstand in Feld 1.20 und der Sondenlänge H in Feld 1.4. Zuerst muss das Feld 1.21 in Übereinstimmung gebracht werden mit dem B/H-Verhältnis der einzugebenden g-function. Dies geschieht durch Anpassen das Sondenabstandes in Feld 1.20. (Die Sondenlänge H in Feld 1.4 muss auf dem effektiven Wert belassen werden.) Dann können die Funktionswerte der einzugebenden g-function an den Stützstellen ln(t/ts) = -4, -2, 0, +2, +3 in die Felder 1.15 bis 1.19 eingegeben werden. Die g-function ist nun vollständig definiert durch die Felder 1.15 bis 1.21.

Bemerkungen:

- Feld 1.14 gibt das Verhältnis von Bohrlochradius rb zur Sondenlänge H an. Dieses Verhältnis beträgt für alle hinterlegten (und auch für die meisten publizierten) g-functions 0.0005. Es kann nicht verändert werden und ist der Vollständigkeit halber angegeben.
- Für die Berechnungen ist weiterhin das effektive Verhältnis B/H eff in Feld 1.6a massgebend (und nicht etwa B/H aus Feld 1.21). Beim nächsten Berechnungs-Run wird durch das Programm automatisch die eingegebene g-function auf das effektive Verhältnis B/H eff extrapoliert.
- Falls wie empfohlen die g-function in Feld 1.11 unter der Auswahl „eigene Eingabe“ eingegeben wird, so wird sie nach dem Speichern eines Berechnungs-Runs auch bei einem späteren Laden dieses Runs wieder unter der Auswahl „eigene Eingabe“ zur Verfügung stehen.
- Nähere Angaben zu g-functions sind im Anhang zu finden.

3.3 Beliebige Sondenfelder: Blatt „Sondenanordnung“

Nur in der **Vollversion** des Programms EWS gibt es eine weitere, elegante Möglichkeit zur Eingabe von beliebigen Sondenanordnungen. Dazu wird zunächst in der Menü-Zeile unter der Rubrik „Eingaben“ das Blatt „Sondenfeld“ angewählt (cf. Abb. 3.11)

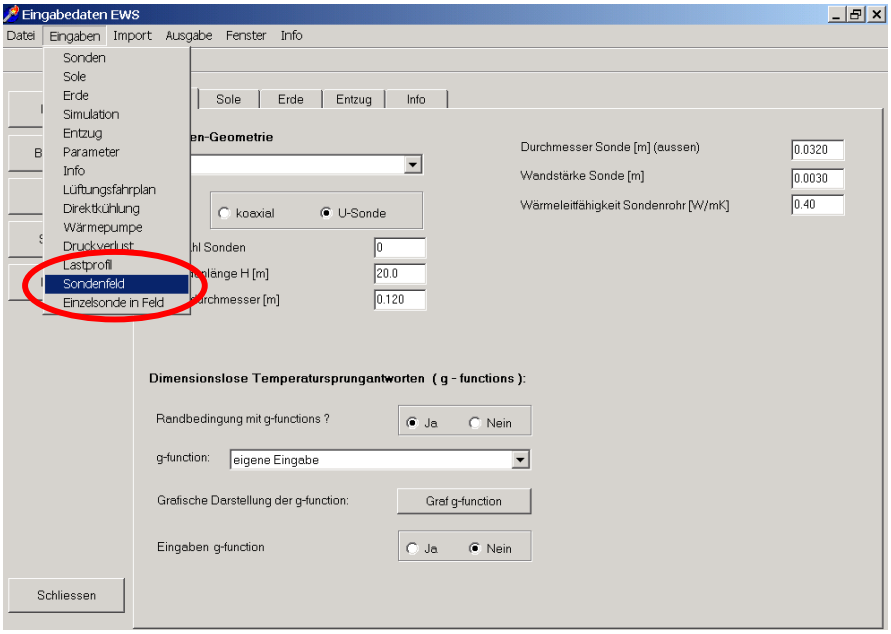


Abb. 3.11: Aufruf des Blattes "Sondenfeld" unter der Rubrik „Eingaben“.

In der Vollversion des Programms EWS erscheint nun das Blatt „Sondenanordnung“ mit einem Rasterfeld. Der Abstand zwischen je zwei Rasterlinien entspricht einem Meter. Alle 10 Meter ist die Rasterlinie dicker gezeichnet. Die Rasterlinien entsprechen einem Koordinatennetz, wobei die linke, obere Ecke die Koordinaten 0 / 0 hat.

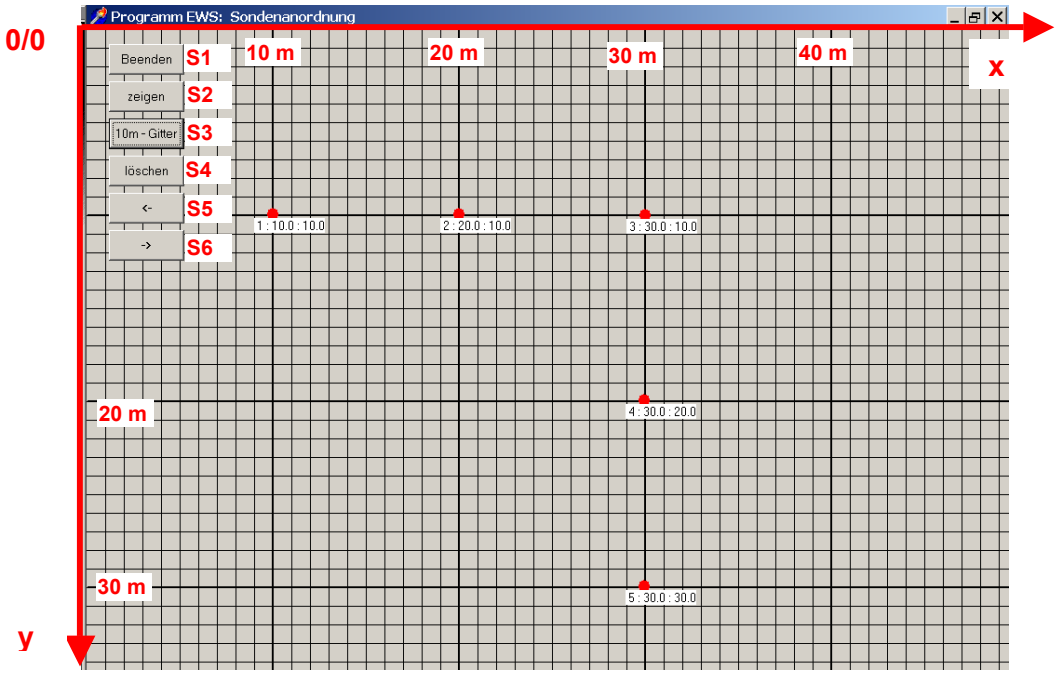


Abb. 3.12: Blatt „Sondenanordnung“ mit Rasterfeld (1 Linie pro Meter).

3.3.1 Setzen, verschieben und löschen von Erdsonden im Sondenfeld

Mit der linken Maustaste können nun ***bis zu 150*** (in Pro-Version bis 600) Erdwärmesonden beliebig auf dem Sondenfeld angeordnet werden. Direkt unterhalb jeder Sonde erscheint die Sonden-Nummer (von 1 hochgezählt in der Reihenfolge, wie die Sonden auf dem Feld gesetzt wurden), gefolgt von der x-Koordinate und von der y-Koordinate der Sonde. x-Koordinate und y-Koordinate entsprechen dem Abstand in Metern von der linken, oberen Ecke des Sondenfeldes. Mit der Taste **S4** kann das Gitternetz von einem 1m-Abstand auf einen 10m-Abstand gesetzt werden. Jede Sonde kann auf 10cm genau gesetzt werden und jederzeit mit der Maus wieder ***verschoben*** werden. Dazu wird die Sonde im Zentrum mit der ***linken Maustaste*** angewählt und mit gedrückter, linker Maustaste verschoben. Überzählige Sonden können auch wieder ***gelöscht*** werden. Dazu wird die Sonde im Zentrum mit der ***rechten Maustaste*** angewählt und verschoben. Dabei verschwindet die entsprechende Erdwärmesonde. Die Sonden werden neu nummeriert.

Mit der Taste **S3** erscheinen 3 konzentrische Kreise um jede Sonde, wobei die Farben einen Hinweis geben über den g-Wert im Sondenfeld: Rot ist ein Hinweis auf einen hohen g-Wert, blau auf einen tiefen g-Wert, wobei die Farbzuweisung nicht absolut, sondern relativ ist: Der höchste Wert im Feld hat immer das gleiche Rot, der tiefste immer das gleiche Blau. Die Farben geben also einen Hinweis auf die relative Temperaturverteilung im Erdreich um die Erdwärmesonden.

Ist das Sondenfeld grösser als der Anzeigebereich auf dem Bildschirm, so kann der das Sondenfeld mit der Taste **S6** vergrössert werden, mit der Taste **S7** wird der Anzeigebereich wieder verkleinert, wobei Koordinaten 0/0 immer im linken, oberen Eck bleiben. Mit der Taste **S5** „löschen“ werden **alle** Sonden aus dem Feld gelöscht.

Mit der Taste **S2** kann die ganze Darstellung in die Zwischenablage kopiert werden und mit der Taste **S1** verlässt man das Blatt „Sondenanordnung“, wobei alle Eingaben übernommen werden (Anzahl und Koordinaten der Sonden, Sondenabstände, g-functions). Die g-function-Werte werden in die Felder 1.15 – 1.19 des Blattes Sonden übertragen und können dort überprüft werden.¨

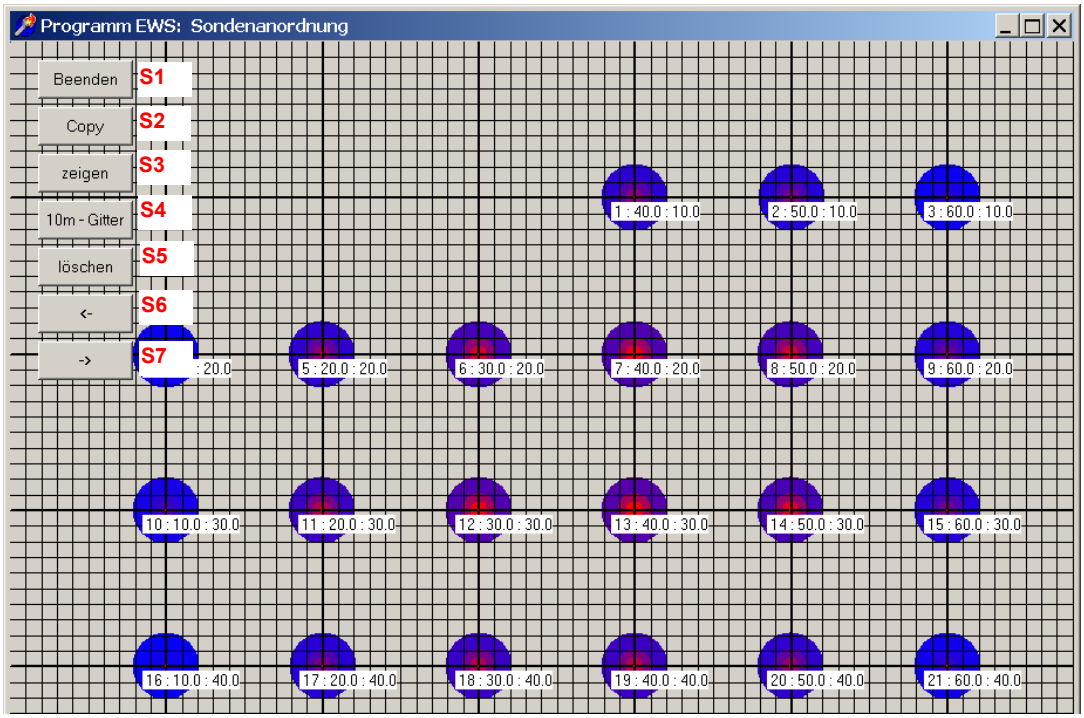


Abb. 3.13: Blatt „Sondenanordnung“ mit 21 Erdwärmesonden. „Blaue“ Sonden ergeben einen hohen Ertrag, „rote“ Sonden einen tiefen Ertrag.

3.3.2 Optimieren von Sondenfeldern

An einem Beispiel mit 5 x 10 Sonden soll das Vorgehen beim Optimieren von Sondenfeldern dargestellt werden. Die Sonden mit dem grössten Ertrag zeigen eine blaue Farbe, die Sonden mit geringerem Ertrag (im Zentrum des Feldes, wo die Wärme schlecht nachfliessen kann) sind aussen violett und innen stark rot. Mit Hilfe der grafischen Darstellung der g-functions mit der **Taste 1.12** wird der Unterschied sofort sichtbar: Durch das einfache Versetzen der 4 innersten Sonden kann die g-function des Sondenfeldes um 8% gesenkt werden. Dies bedeutet, dass die Bohrlochtemperatur im Gleichgewichtszustand im rechten Beispiel 8% weniger stark sinkt als links.

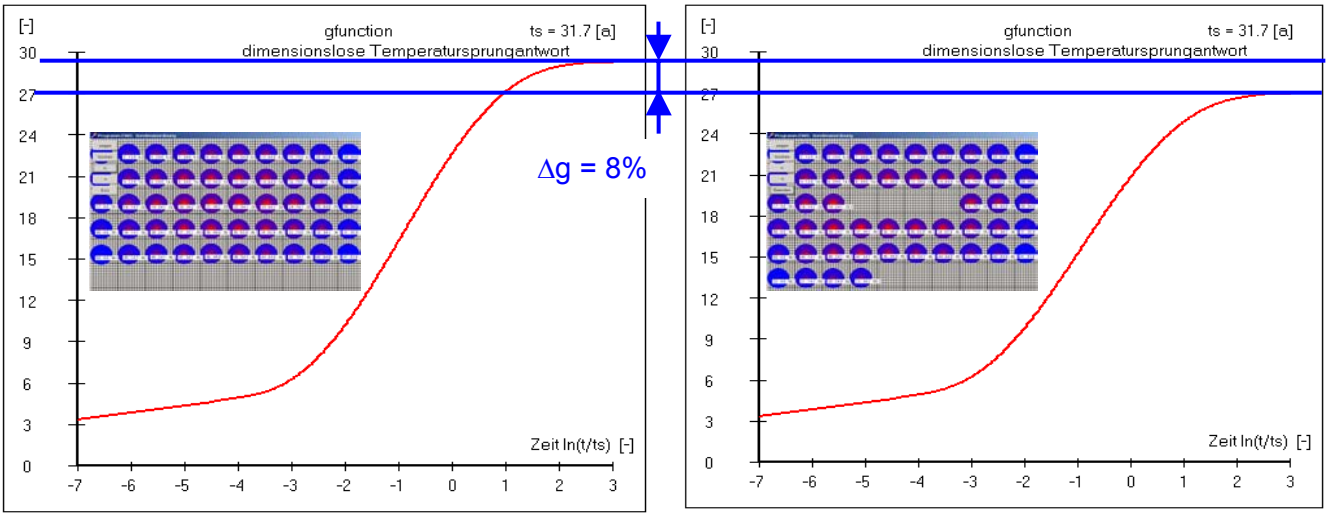


Abb. 3.14: Vergleich von 2 Anordnungen mit je 50 Sonden à 100m Bohrtiefe und 10m Abstand.

3.3.3 Berechnung Einzelsonde im Sondenfeld

Wurde das Sondenfeld entsprechend der Beschreibung in Kapitel 3.3 definiert, so besteht auch die Möglichkeit, die g-function einer Einzelsonde im Sondenfeld zu berechnen:

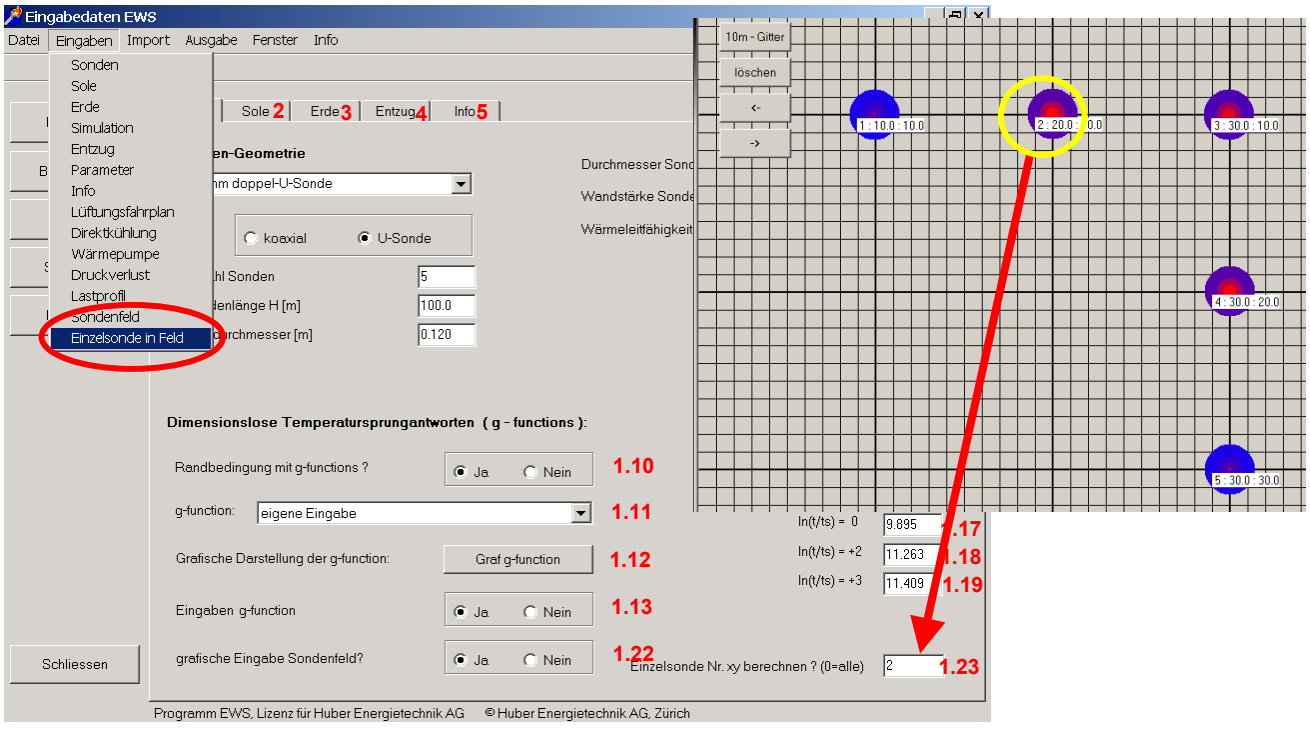


Abb. 3.15: Berechnung einer Einzelsonde im Sondenfeld.

3.3.4 Einfügen von Karten im Hintergrund in 4 Schritten:

In der Vollversion des Programms gibt es auch die Möglichkeit, Karten für die Sondenanordnung massstäblich zu hinterlegen. Die Karte muss dazu im BMP-Format sein und zunächst in die Zwischenablage (z.B. mit „Printscreen“ aus einem GIS-Browser) und von dort mit Hilfe der **mittleren Maustaste (Rad)** durch Klicken ins Blatt „Sondenanordnung“ kopiert werde. Anschliessend kann das Gitternetz auf der Karte so skaliert werden, dass dieses mit dem Kartenmassstab übereinstimmt (mit Hilfe der Taste **S8** „Messen“ und der frei einsetzbaren Distanz **S9**). Mit Hilfe der Tasten **S6** und **S7** kann die Karte und das Gitternetz sodann auf die gewünschte Grösse auf dem Bildschirm angepasst werden. Jetzt ist das Blatt „Sondenanordnung bereit für das Einfügen der Erdwärmesonden (cf. Kapitel 3.3.1). Sobald Sonden auf dem Blatt eingegeben sind, kann die Hintergrundkarte nicht mehr verändert werden. Nachfolgend sind die 4 Schritte für das Einfügen einer Hintergrundkarte ausführlich dargestellt:

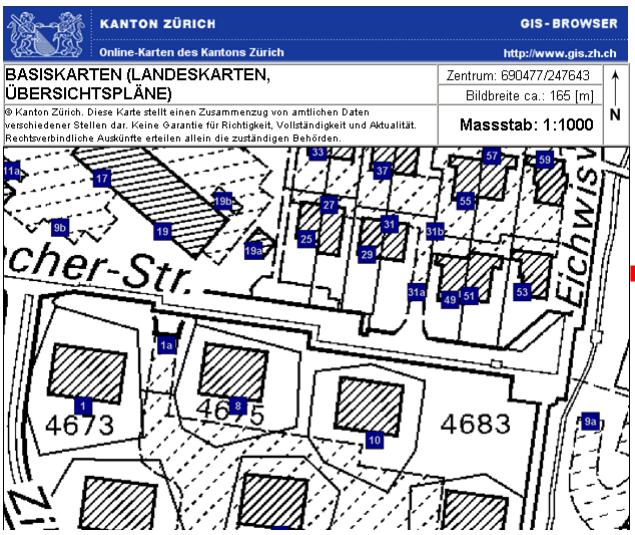


Abb. 3.16: 1. Schritt: Geeignete Karte in die Zwischenablage kopieren (z.B. mit Printscreen von einem GIS-Browser wie www.gis.zh.ch)

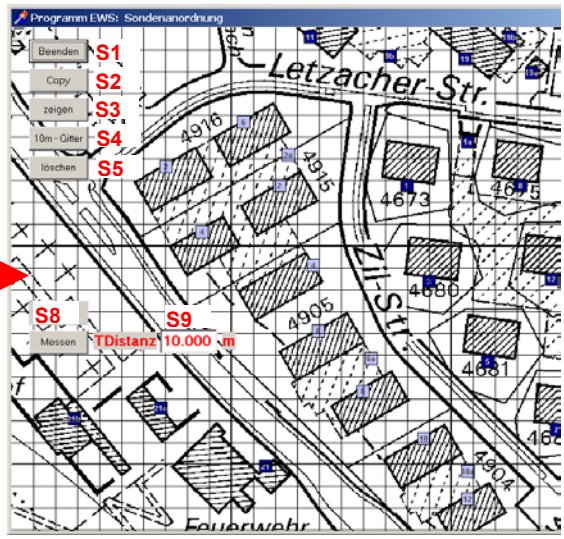


Abb. 3.17: 2. Schritt: Mit der mittleren Maustaste (Rad) irgendwo in das Blatt „Sondenanordnung“ klicken. Zwischenablage wird eingefügt.

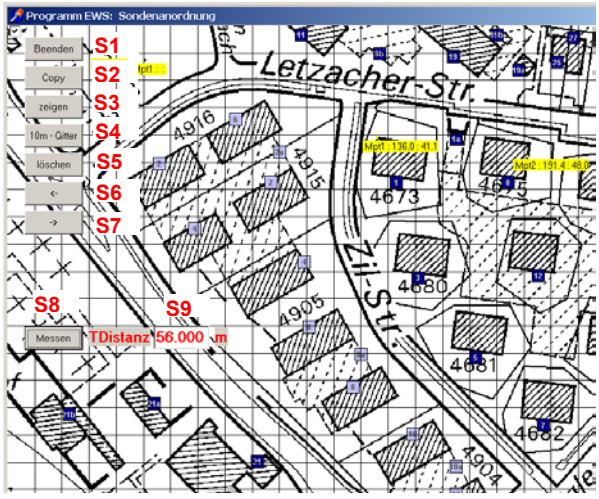


Abb. 3.18: 3. Schritt, Gitternetz skalieren: Auf der Karte 2 markante Punkte auswählen, Distanz bestimmen und in Feld S9 eingeben. Anschliessend beide Messpunkte mit Maus auf Karte anwählen und durch Klicken mit der Maus irgendwo auf Blatt abschliessen.

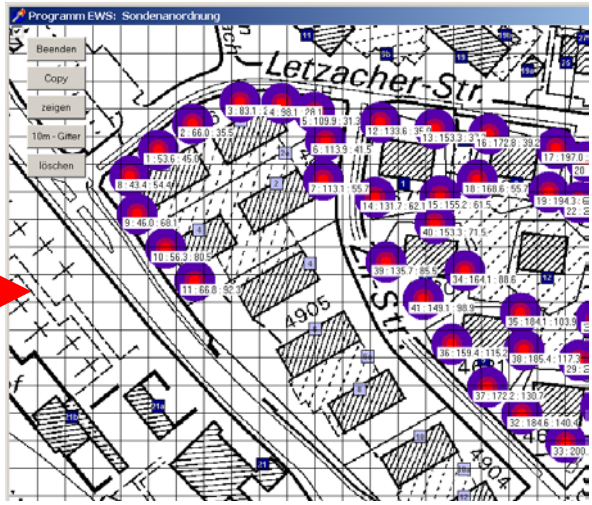


Abb. 3.19: 4. Schritt: Kartengrösse mit Taste S6 und S7 auf die gewünschte Grösse skalieren und Sonden gemäss Beschreibung Kapitel 3.3.1 eingeben. Achtung: Sobald Erdwärmesonden angewählt sind, kann die Karte nicht mehr angepasst werden.

3.3.5 Nachbarsonden und neue Sondendarstellung in der Pro-Version

In der Pro-Version gibt es neu die Möglichkeit, Nachbarsonden zu berücksichtigen. Dabei geht das Programm EWS davon aus, dass Nachbarsonden thermisch gleich belastet sind wie Erdwärmesonden des Projektes selbst. Die Beschreibung des Rechenverfahrens findet sich im Kapitel 6.5.

Die mit „Nachbar“ bezeichnete Taste **S10** erscheint erst, wenn in der Pro-Version des Programms ein Plan gemäss Kapitel 3.3.2 eingefügt wurde. Durch drücken auf diese Taste wird in den „Nachbar-Modus“ umgeschaltet. In diesem Modus werden alle neu eingefügten Sonden als Nachbarsonden gelb markiert. Nachbarsonden gehören nicht zum aktuellen Projekt, beeinflussen aber die g-function und damit das Rechenergebnis. Durch nochmaliges drücken der Taste „Nachbar“ wird wieder in den normalen Modus zurückgeschaltet und es können weitere Projekt-Sonden eingegeben werden. Nachbarsonden können wie die Projekt-Sonden verschoben und gelöscht werden.

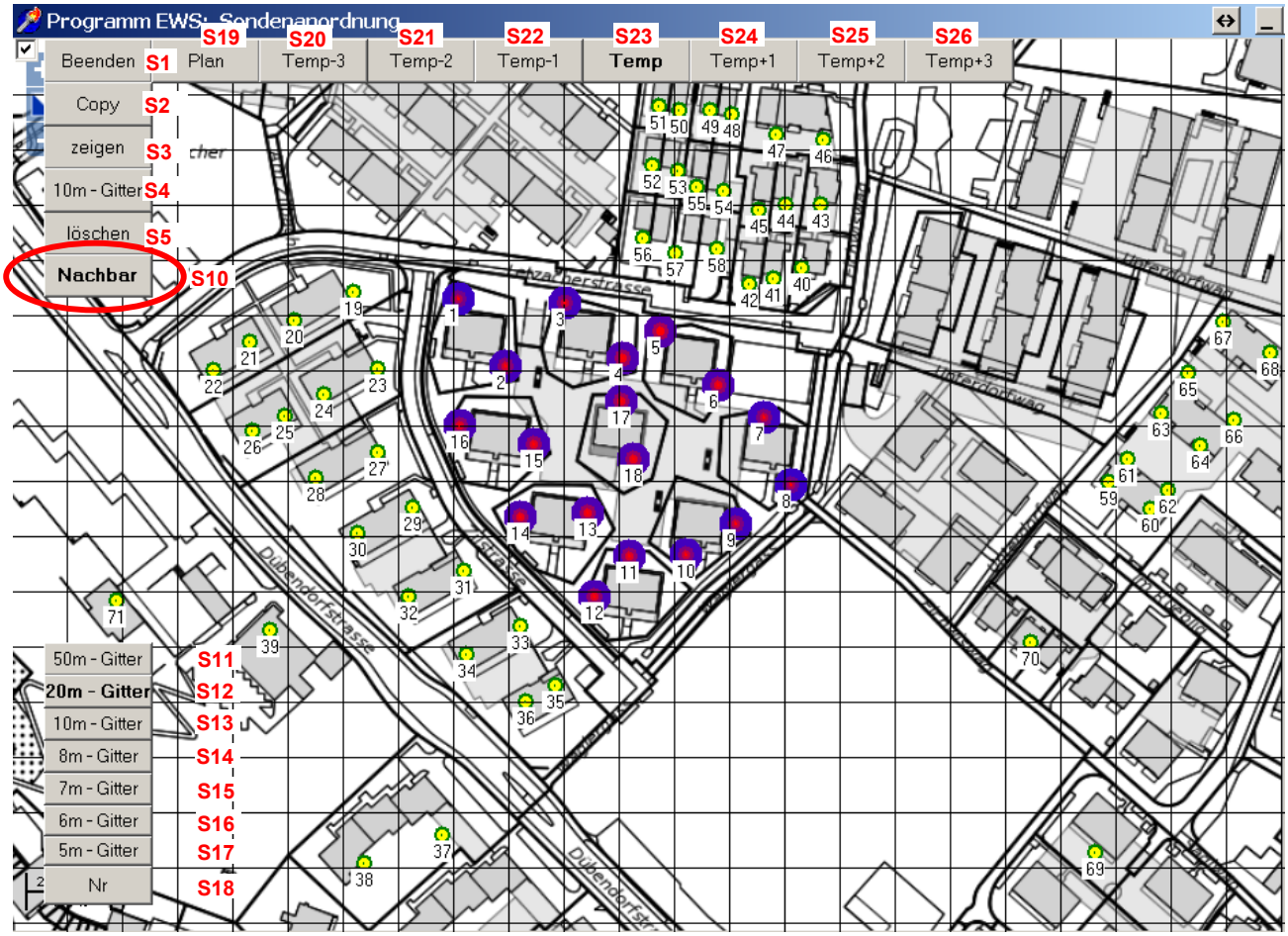


Abb. 3.20: Eingabe von Nachbarsonden (gelb) in der Pro-Version

In der Pro-Version wurde zusätzlich eine neue Darstellungsform implementiert, die geeignet ist, ganze Quartiere mit bis zu **600 Erdwärmesonden** oder Energiepfähle darzustellen. In dieser neuen Darstellungsform werden die Erdwärmesonden kleiner dargestellt. Die Koordinaten der Erdwärmesonden werden nur noch beim Fassen und Verschieben der Erdwärmesonden mit der Maus dargestellt. Dafür kann die Sonden-Nummer mit der Taste **S18** ein- und ausgeblendet werden. Aktiviert wird die neuen Darstellungsform durch die Wahl des Gitternetzes zwischen 5m und 50m mit den Tasten **S11 bis S17**. Das jeweils gewählte Gitternetz ist auf der Taste S11-S17 fett markiert.

3.3.6 Darstellung der Bodentemperaturen in der Pro-Version

In der Pro-Version des Programms EWS kann die Abkühlung (bzw. die Erwärmung) der Bodentemperaturen nach 50 Jahren im Jahresdurchschnitt im Erdreich dargestellt werden. Farblich wird eine Abkühlung und Erwärmung gleich dargestellt. Nicht dargestellt sind die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen im Sonden-Nahbereich, die aus dem Verlauf des Lastprofils über das Jahr resultieren. Die feinen, schwarzen Linien markieren Isothermen, der Abstand zwischen diesen Linien beträgt jeweils 1K Temperaturdifferenz. Die Farbskala kann mit den Tasten **S20 bis S26** eingestellt werden. Die Bodentemperaturen können nur dargestellt werden, wenn gemäss Kapitel 3.3.4 vorgängig eine Karte hinterlegt wurde. Die Darstellung erfolgt in der gleichen Grösse wie die hinterlegte Karte.

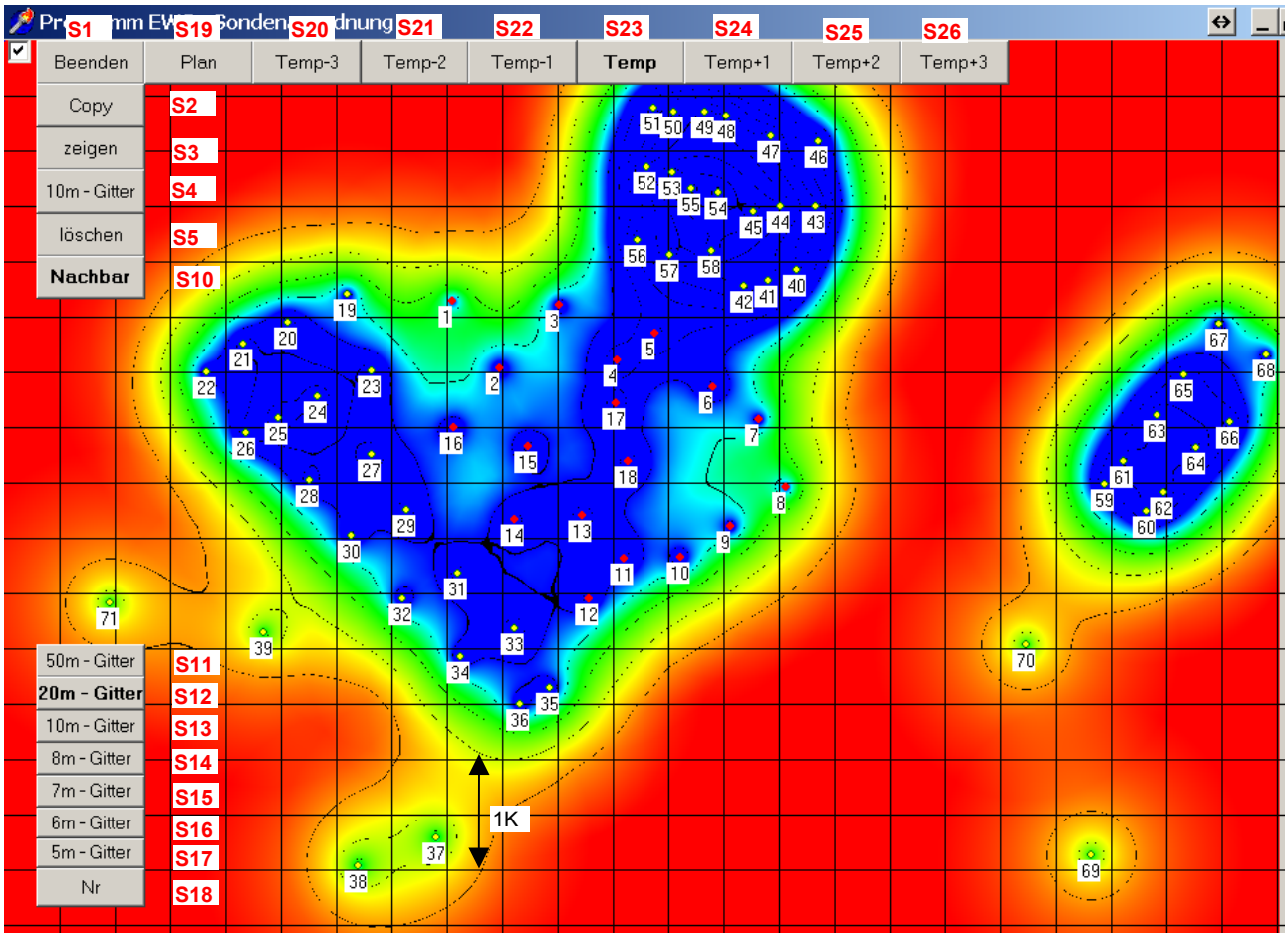


Abb. 3.21: Darstellung der Bodentemperaturen nach 50 Betriebsjahren in der Pro-Version

Die Bodentemperaturen können nur korrekt dargestellt werden, wenn vorgängig das Sondenfeld mit dem korrekten Lastprofil berechnet wurde. Dazu muss nach dem Abschluss der Eingabe der Erdwärmesonden auf dem Plan zunächst mit der Taste **S1** das Blatt „Sondenanordnung“ geschlossen werden und es ist eine Neuberechnung durchzuführen. Danach kann wieder auf das Blatt „Sondenanordnung“ gewechselt werden (cf. Abb. 3.11). Auch beim Einlesen einer gespeicherten Berechnung muss zunächst eine Neuberechnung durchgeführt werden. Danach ist das gewünschte Gitternetz (S11 – S17) zu wählen und dann können mit den Tasten **S20 bis S26** die Bodentemperaturen berechnet und dargestellt werden. Die Tasten S20 bis S26 unterscheiden sich einzig durch die dargestellte Farbskala. Mit der Taste **S19** oder beim Wechsel des Gitternetzes (S11-S17) geht man wieder auf die Plan-Ansicht zurück.

3.4 Blatt "Sole"

Im Blatt "Sole" werden Angaben zum Fluid und zu der Sondenhinterfüllung eingesetzt.

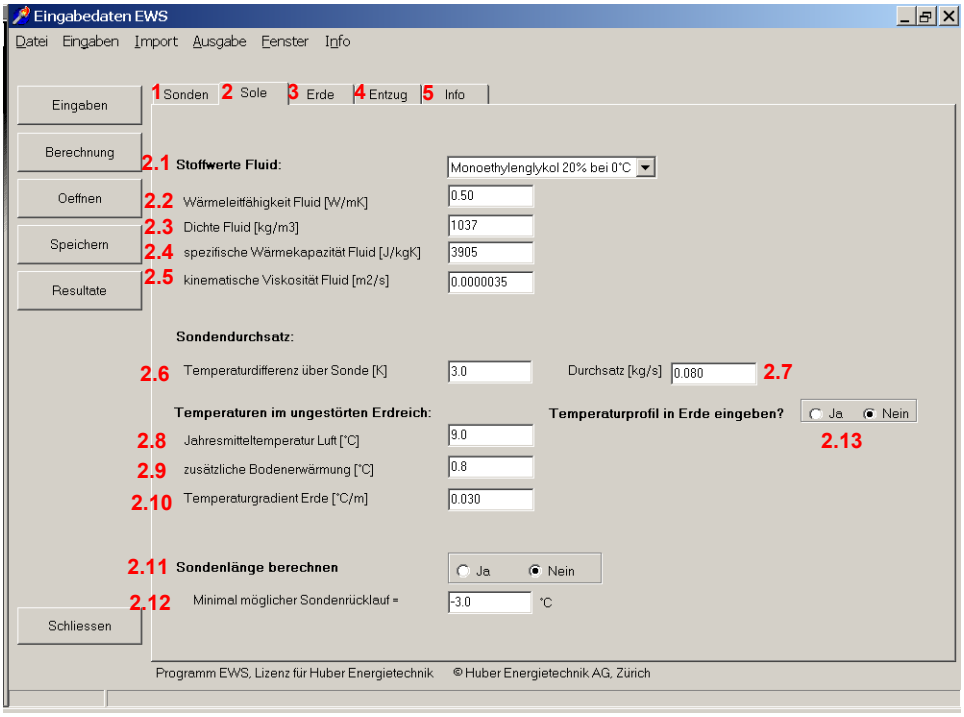


Abb. 3.22: Blatt „Sole“.

Feld 2.1 Durch die Auswahl des Sondenfluids werden die übrigen Daten zu der Leitfähigkeit, Dichte, spezifischen Wärmekapazität und kinematischen Viskosität des Fluids automatisch eingefügt. Wird ein nicht aufgeführtes Sondenfluid verwendet, besteht die Möglichkeit, in Feld 2.1 den letzten Auswahlpunkt "nicht definiert" anzuwählen und die Werte der **Felder 2.2 bis 2.5** manuell einzugeben.

Felder 2.6/2.7 Der Auslegungsmassenstrom **(Sondendurchsatz durch alle Sonden zusammen)** wird in **Feld 2.7** eingegeben. Als Alternative zum Sondendurchsatz kann in **Feld 2.6** auch die Temperaturdifferenz zwischen Sondenvor- und Sondenrücklauf eingegeben werden. Bei diesem Feld handelt es sich um eine reine Eingabehilfe, die für die Berechnung nicht verwendet wird. Wird Feld 2.6 angepasst so berechnet das Programm mit Hilfe der Beziehung

$$\dot{m} = = \frac{\dot{Q}}{\Delta T \cdot c_p} \qquad \text{Gl. 3.1}$$

den Sondendurchsatz in **Feld 2.7** aus der Entzugsleistung Q (**Feld 4.4**), der Temperaturdifferenz (**Feld 2.6**) und der Wärmekapazität der Sole (**Feld 2.4**) gemäss Gl. 3.1 sofort neu.

Ist andererseits der Sondendurchsatz bekannt, so kann dieser ohne Anpassung des Feldes 2.6 direkt in **Feld 2.7** eingegeben werden. In diesem Fall erfolgt keine automatische Anpassung des Feldes 2.6, da dieser Wert für die Berechnung nicht benötigt wird. Es kann also vorkommen, dass der Wert 2.6 nicht mit dem Wert 2.7 übereinstimmt! Wird andererseits später die Entzugsleistung Q (Feld 4.4) oder die Wärmekapazität cp (Feld 2.4) angepasst, so wird immer sofort der Sondendurchsatz gemäss Gl. 3.1 neu berechnet. Es empfiehlt sich deshalb, in Feld 2.6 immer den korrekten Wert einzugeben, selbst wenn der Sondendurchsatz in Feld 2.7 direkt eingegeben wird.

3.4.1 Eingabe der unbeeinflussten Erdreichtemperaturen

Für die Eingabe der unbeeinflussten Erdreichtemperatur in Abhängigkeit der Tiefe (= Startbedingung für die Simulation) gibt es 2 Methoden:

1. Angabe der Jahresmitteltemperatur der Luft (**Feld 2.8**), der zusätzlichen Bodenerwärmung (**Feld 2.9**) und des Temperaturgradienten ΔT_{Grad} in der Tiefe (**Feld 2.10**). Bei der Jahresmitteltemperatur der Luft ist die Höhenabhängigkeit zu berücksichtigen (Abnahme der Temperatur von ca. 0.47K pro 100m Höhe). Die mittlere Lufttemperatur und die Oberflächenerwärmung werden im Programm einfach addiert. Für den Temperaturgradienten ΔT_{Grad}, den geothermischen Wärmestrom aus dem Erdinnern $\dot{q}_{geo}$ und die Wärmeleitfähigkeit der Erde λ_{Earth} gilt dabei der folgende Zusammenhang:

$$\dot{q}_{geo} = \lambda_{Earth} \cdot \Delta T_{Grad} \quad [W/m^2] \qquad \text{Gl. 3.2}$$

2. Direkte Eingabe des Temperaturprofils auf maximal 10 Stützstellen (**Felder 2.15**). Die Oberflächentemperatur wird dabei aus der 1. und 2. Stützstelle und der weitere Verlauf in der Tiefe aus der letzten und zweitletzten Stützstelle linear extrapoliert.

Um von der Methode 1 auf die 2. Methode zu wechseln, muss **Auswahlfeld 2.13** auf „Ja“ gestellt werden. Dann verschwinden die Eingabefelder 2.8 – 2.10 und es erscheinen neu die **Felder 2.15** und der **Button 2.14** („Grafik“). Damit kann das Temperaturprofil dargestellt werden.

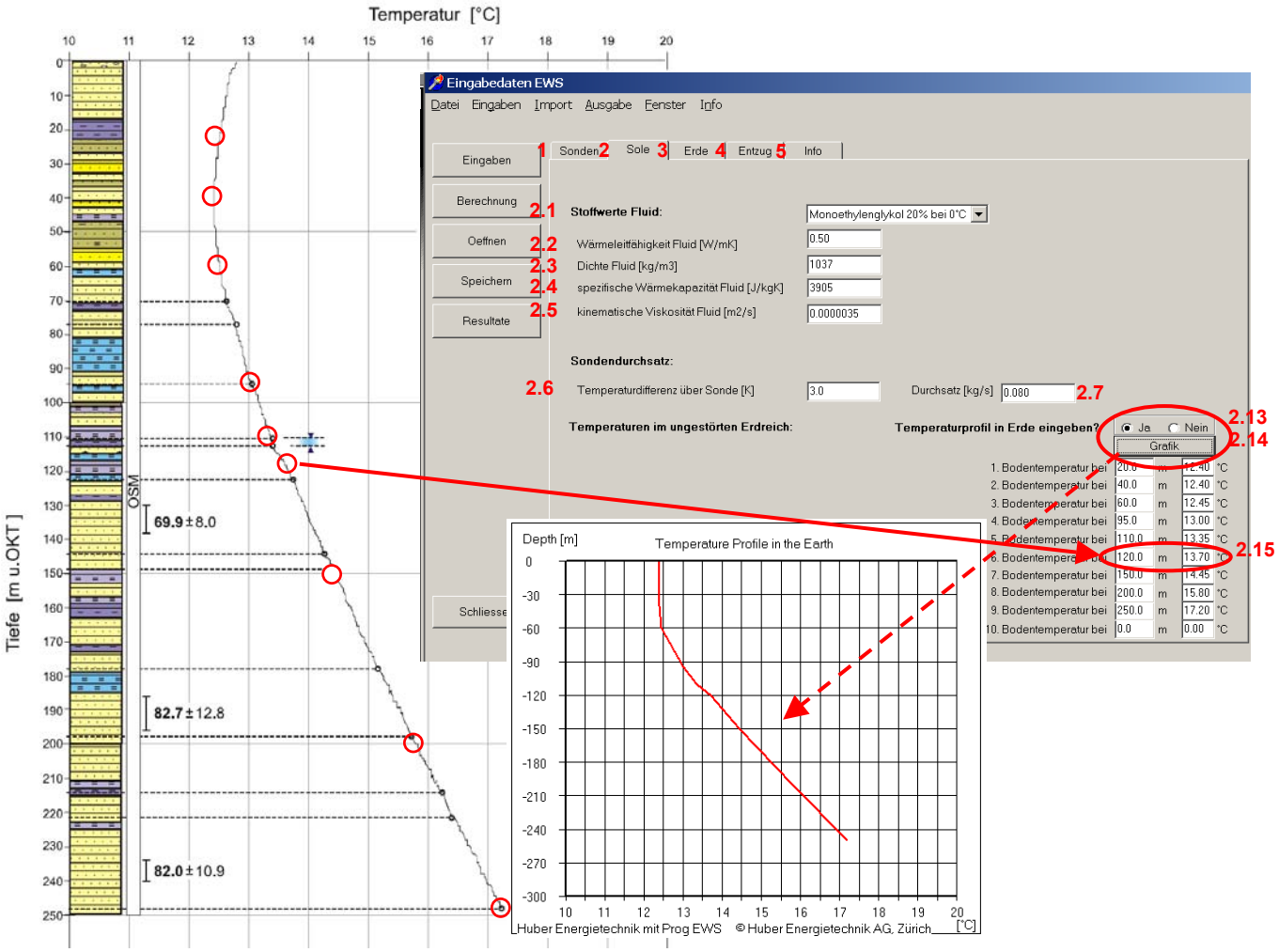


Fig. 3.23: Eingabe des Temperaturprofils der unbeeinflussten Erde aus Messung in der Erdwärmesonde (Messung Dr. U. Schärli / E. Rohner [16]).

3.4.2 Automatische Berechnung der notwendigen Sondenlänge

Das Programm EWS ist in der Lage, eine automatische Berechnung der notwendigen Sondenlänge entsprechend der Norm SIA 384/6 [21] durchzuführen. Dazu ist die Simulationsdauer in Feld 4.8 oder Feld 10.15 auf **50 Jahre** zu setzen und der minimal mögliche Sondenrücklauf in **Feld 2.12** und die Temperaturdifferenz über die Sonde in **Feld 2.6** so zu setzen, dass der Mittelwert zwischen minimalem Sonden-Vorlauf und Sonden-Rücklauf –1.5°C beträgt (z.B. minimaler Sondenrücklauf in **Feld 2.12** auf –3.0°C und Temperaturdifferenz über der Sonde in **Feld 2.6** auf 3.0 K setzen). Um die automatische Berechnung der notwendigen Sondenlänge zu starten, ist das **Auswahlfeld 2.11** auf „Ja“ zu setzen und die Berechnung mit dem Button „Berechnung“ zu starten. Das Programm EWS berechnet nun die minimale Sondenlänge, mit der die formulierten Bedingungen eingehalten werden können. Die notwendige Sondenlänge kann nach der Berechnung nun im **Feld 1.4** ausgelesen werden.

3.5 Blatt "Info"

Dieses Blatt dient dazu, Projekt, Varianten und Ersteller näher zu spezifizieren sowie weitere Anmerkungen einzufügen.

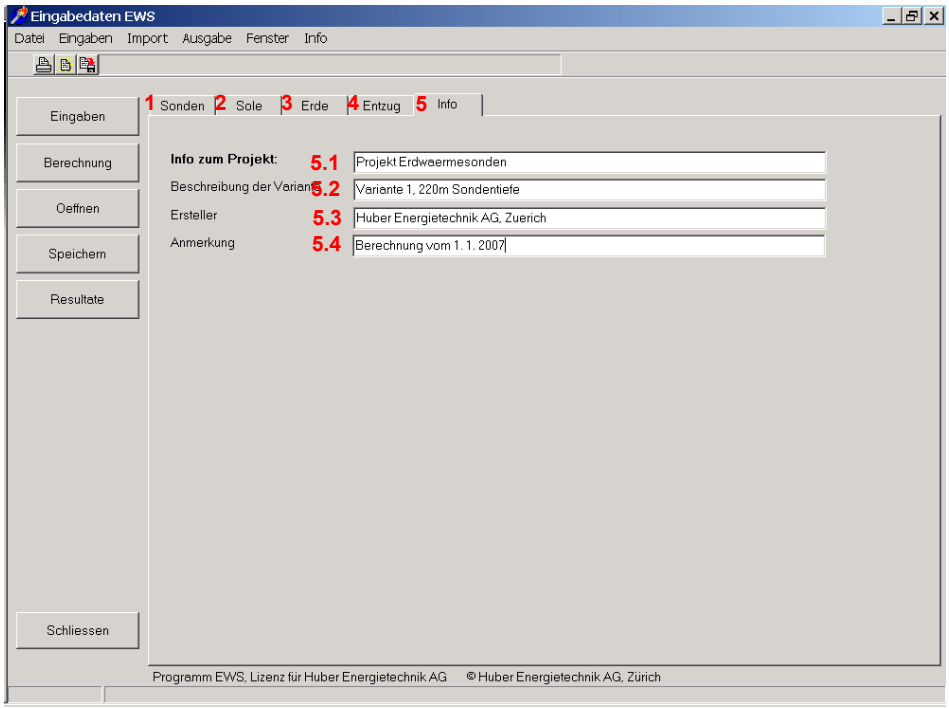


Abb. 3.24: Blatt „Info“.

3.6 Blatt "Erde"

Auf dem Blatt "Erde" werden die Stoffwerte der Erde und der Sondenhinterfüllung angegeben. Zudem wird festgelegt, mit wie vielen, horizontalen Schichten im Erdreich gerechnet wird (3.1, maximal 10). Die thermischen Bohrlochwiderstände R_b und R_a können direkt eingegeben werden. Falls diese nicht bekannt sind, können sie aus der Bohrlochgeometrie und den Stoffwerten der Hinterfüllung mit 2 Methoden berechnet werden (cf. Kapitel 6.8). Die Relevanz dieser Bohrlochwiderstände wird in [12] beschrieben.

3.6.1 Grundeingaben

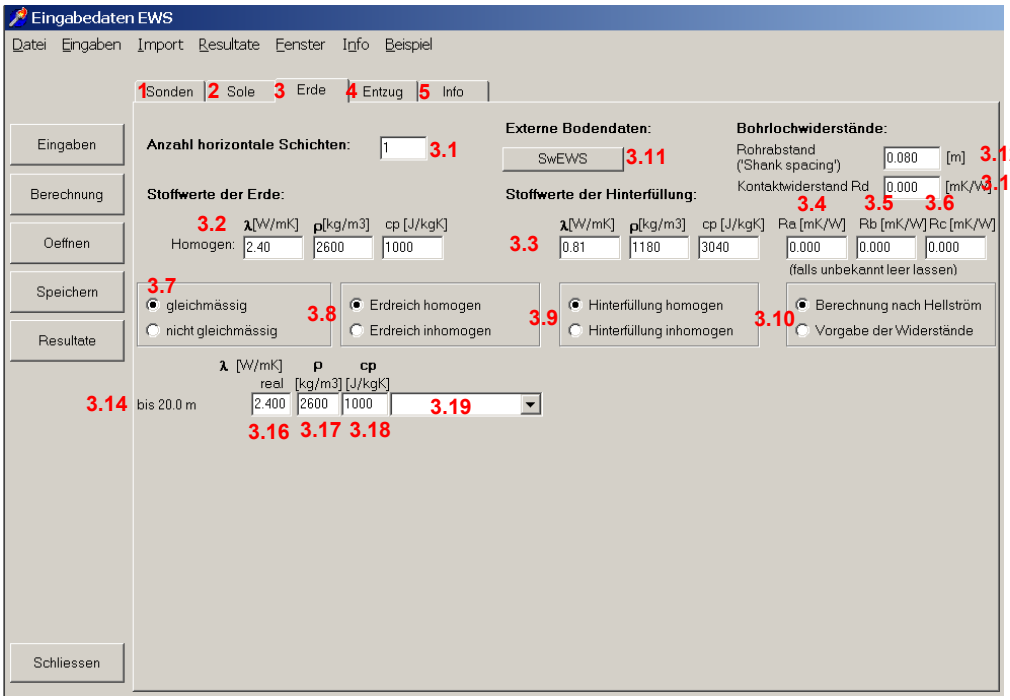


Abb. 3.25: Blatt „Erde“ (mit einer einzigen horizontalen Schicht).

3.1 Zunächst muss vom Programmbenutzer festgelegt werden, mit wie vielen horizontalen Schichten im Erdreich gerechnet werden soll. Für die Berechnung werden gleichmässige Schichtabstände verwendet. Die Berechnung mit nur einer horizontalen Schicht (und durchschnittlichen Stoffwerten über die ganze Bohrtiefe) liefert kürzere Rechenzeiten, aber etwas ungenauere Resultate (numerische Auflösung im Rechengitter). Für eine Grobauslegung und bei Sonden bis 100m Bohrtiefe ist dies aber oft ausreichend.

Das Programm EWS rechnet aus numerischen Gründen intern selbst dann mit gleichmässigen Schichtabständen, wenn in Feld 3.7 ein nicht gleichmässiger, geologischer Schichtabstand angewählt wurde (nur in der Vollversion des Programms möglich). Für die numerischen Rechenschichten werden dann die Stoffwerte aus dem ungleichmässigen, geologischen Schichtaufbau (Felder 3.14-3.19) pro Rechenschicht arithmetisch gemittelt. Diese Mittelung wird vor jedem Rechengang neu durchgeführt, so dass der Benutzer in diesem Fall selbst bei einer Variation der Bohrtiefe keine Anpassungen beim geologischen Schichtaufbau mehr vornehmen muss.

3.2 „homogene Stoffwerte“ der Erde: Falls in Feld 3.7 gleichmässige Schichtabstände und in Feld 3.8 „Erdreich homogen“ angewählt wurde, so können in den Eingabefeldern 3.2 die Mittelwerte der Stoffeigenschaften über die ganze Bohrtiefe eingegeben werden (Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK], Dichte ρ [kg/m3], spezifische Wärmekapazität cp [J/kgK]). Diese Werte werden dann vom Programm in die Felder 3.16 – 3.18 automatisch übertragen. Das Programm rechnet intern immer mit den Werten in den Feldern 3.16 – 3.18. Werden nachträglich die Werte in den Feldern 3.16 – 3.18 angepasst, so kann es vorkommen, dass diese Werte nicht mehr mit den Feldern 3.2 übereinstimmen. In diesem Fall werden die Eingaben aus den Feldern 3.2 ignoriert und bei der nächsten Neuberechnung angepasst.

Ausserdem berechnet das Programm EWS bei jedem Rechengang den arithmetischen Mittelwert der Stoffwerte aus den Feldern 3.16 - 3.18 über die Bohrtiefe (Eingabe aus Feld 1.4) und zeigt diese Werte nach jedem Rechengang neu an.

Bei den Feldern 3.2 handelt es sich somit einerseits um eine Eingabenhilfe und andererseits ein Ausgabefeld mit der Information über den Mittelwert der Stoffwerte über die ganze Bohrtiefe. In keinem Fall wird mit diesen Werten direkt weitergerechnet.

3.3 Falls in Feld 3.9 „Hinterfüllung homogen“ angewählt wurde (was in der Regel der Fall ist), oder nur mit einer horizontalen Schicht gerechnet wird (Feld 3.1 = 1), so können in 3.3 die Stoffeigenschaften der Bohrlochhinterfüllung eingegeben werden (Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK], Dichte ρ [kg/m3], spezifische Wärmekapazität cp [J/kgK]). Die Stoffeigenschaften der Hinterfüllung werden zur Berechnung der thermischen Bohrlochwiderstände R_a und R_b verwendet (cf. Kapitel 6.8).

3.4 – 3.6 In den Feldern 3.4 – 3.6 sind die **Bohrlochwiderstände R_a, R_b und R_c** zu finden. Für die Definitionen der Widerstände R_a, R_b und R_c sei auf Kap. 6.8. verwiesen.

3.12 Der **Kontaktwiderstand R_d** ist ein zusätzlicher Widerstand zwischen Bohrloch und Hinterfüllung. Der Wert von R_d wird immer zum Wert von R_b dazugezählt.

3.4 – 3.6 In der Default-Einstellung des Programms werden die Bohrlochwiderstände mit den Formeln von Hellström (cf. Kapitel 6.8, Auswahl in Feld 3.10) berechnet. In diesem Fall werden die Eingaben in den Feldern 3.4 – 3.6 ignoriert (es ist also **keine Eingabe notwendig**) und die Bohrlochwiderstände vor jedem Rechengang mit den Gleichungen von Hellström (Kapitel 6.8) aus den Stoffwerten (Feld 3.3), dem Sondendurchsatz im Auslegungsfall (Feld 2.7) und dem Rohrabstand der Sondenrohre im Bohrloch (Feld 3.12) neu berechnet. Die berechneten Werte für R_a, R_b und R_c werden nach jedem Rechengang neu in den Feldern 3.4 – 3.6 angezeigt.

Wird in Feld 3.10 „Vorgabe der Widerstände“ angewählt, so können der interne Bohrlochwiderstand R_a (Feld 3.4) und der Bohrlochwiderstand R_b (Feld 3.5) frei eingegeben werden. R_c (Feld 3.6) **muss** in diesem Fall **Null gesetzt** werden. Wird in R_c (Feld3.6) trotzdem ein Wert eingesetzt, so wird R_b mit Gl. 6.33 neu berechnet und damit die Eingabe überschrieben. Da R_a und R_b von der Fliessgeschwindigkeit des Sondenfluids abhängen (über den Wärmübergangswert α), werden R_a und R_b (nicht aber R_c) bei einer Anpassung des Sondendurchsatzes (Feld 2.7) auf Null gesetzt und mit dem aktuellen Durchsatz mit Gl. 6.33 neu berechnet. Der exakte Rechengang und alle möglichen Eingabevarianten sind in [5] beschrieben.

3.10 / 3.12: Falls in Feld 3.10 die Berechnungsart nach Hellström gewählt wird, muss in den Feldern 3.4 - 3.6 kein Wert für die thermischen Widerstände eingegeben werden, da diese im nächsten Rechengang vom Programm selber berechnet werden. Bei der Berechnungsart nach Hellström ist jedoch in Feld 3.12 der Rohrabstand des hinaufströmenden zum hinunterströmenden Fluid (shank spacing) einzugeben (siehe Kap. 3.2.2). Üblicherweise kann für den Rohrabstand der vorgeschlagene Default-Wert verwendet werden. Dabei wird der Rohrabstand aus dem Bohrdurchmesser und dem Sondendurchmesser berechnet, unter der Annahme dass die Sondenrohre eher nahe am Bohrlochrand liegen. Bei einer nachträglichen Anpassung der Bohrdurchmessers wird der Rohrabstand allerdings nicht automatisch neu angepasst.

3.11 Mit dem Button 3.11 können Stoffwerte aus dem Schweizer Molassebecken, die mit dem Programm SwEWS [10] erzeugt wurden, in das Programm EWS eingelesen werden.

Achtung: Immer zuerst die Anzahl Schichten (Feld 3.1) eingeben, bevor die Stoffdaten von SwEWS eingelesen werden.

3.6.2 Eingabe mehrerer horizontaler Schichten

Mit der Wahl der Schichtanzahl > 1 (Feld 3.1) wird das Erdreich in die entsprechende Anzahl horizontale Schichten unterteilt (Abb. 3.26). Es können maximal 10 horizontale Schichten definiert werden. Falls in Feld 3.7 „gleichmässig“ gewählt wird, sind die Schichten äquidistant. Um Schichten mit unterschiedlicher Dicke einzugeben, muss die Option „nicht gleichmässig“ in Feld 3.7 selektiert werden (**nur in Vollversion möglich**). Die gewählte Anzahl geologischer Schichten entspricht der Anzahl der numerischen Rechenschichten, wobei diese immer gleichmässig über die Bohrtiefe verteilt sind. Die Tiefe der letzten, geologischen Schicht muss immer >= der Bohrtiefe sein.

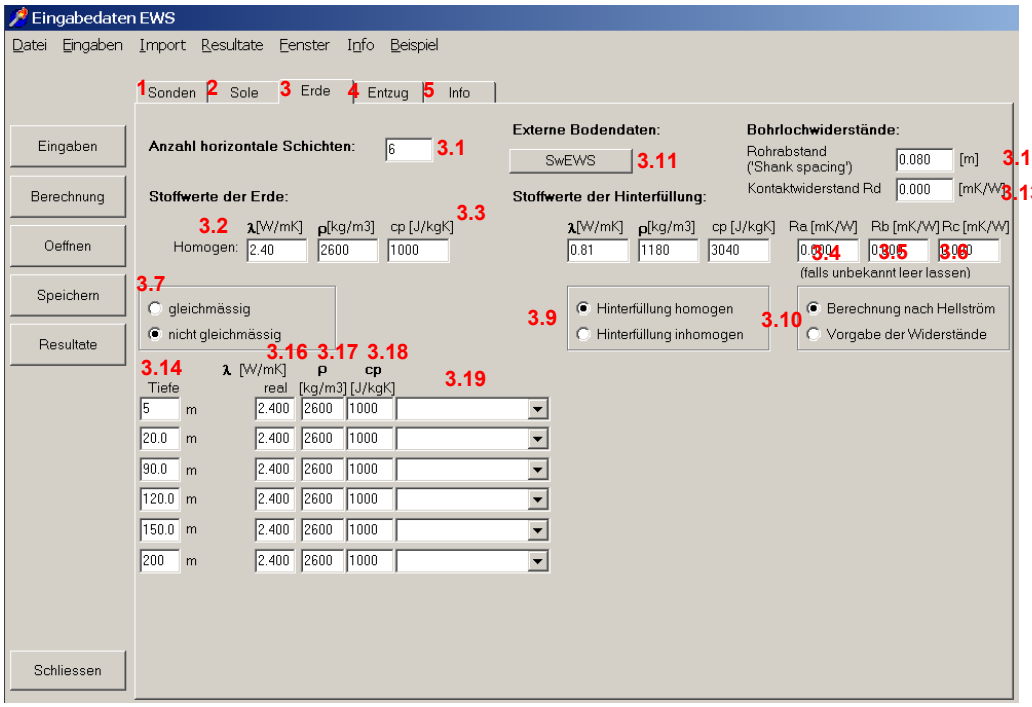


Abb. 3.26: Blatt „Erde“ mit 6 horizontalen Schichten von unterschiedlicher Schichtdicke.

Achtung: Die Tiefe gibt nicht die Schichtdicke, sondern das untere Ende der jeweiligen Schicht unter der Oberfläche (Bohrtiefe) an.

Für jede Schicht können nun verschiedene Stoffwerte für das Erdreich eingegeben werden. Es können auch Schichten eingegeben werden, die tiefer als die Erdsonde liegen. Diese werden bei der Berechnung nicht berücksichtigt, solange die Erdsonde diese Schichten nicht erreicht. Deshalb wird empfohlen, die gesamte, bekannte Geologie einzutragen. So wird auch bei einer nachträglichen Verlängerung der Erdsonde mit den richtigen Stoffwerten gerechnet.

Wenn auch die Hinterfüllung horizontal unterschiedliche Stoffwerte aufweisen soll, so kann im Feld 3.9 „Hinterfüllung inhomogen“ angewählt werden. Diese Option ist nur möglich, falls die Schichten äquidistant aufgeteilt sind, d.h. in Feld 3.7 „gleichmässig“ gewählt wurde. Es erscheinen dann für die gleiche horizontale Unterteilung wie bei den Erdschichten zusätzliche Zeilen zur Eingabe der Stoffwerte der Hinterfüllung (Felder 3.20) sowie der Bohrlochwiderstände (Felder 3.21). Als Default-Werte werden die Stoffwerte aus Feld 3.3 bzw. 3.4-3.6 übernommen.

3.20 Die Stoffwerte der horizontalen Hinterfüllungsschichten können direkt in die Zellen eingegeben werden.

3.21 Für die Eingabe der Bohrlochwiderstandswerte R_a, R_b und R_c sind die analogen Punkte wie die Eingabe der Felder 3.4 - 3.6 in Kapitel 3.6.1 zu beachten.

3.4 – 3.6 Nach der Durchführung jeder Berechnung werden in Feld 3.3 - 3.6 die arithmetischen Mittelwerte der Felder 3.20 - 3.21 angezeigt.

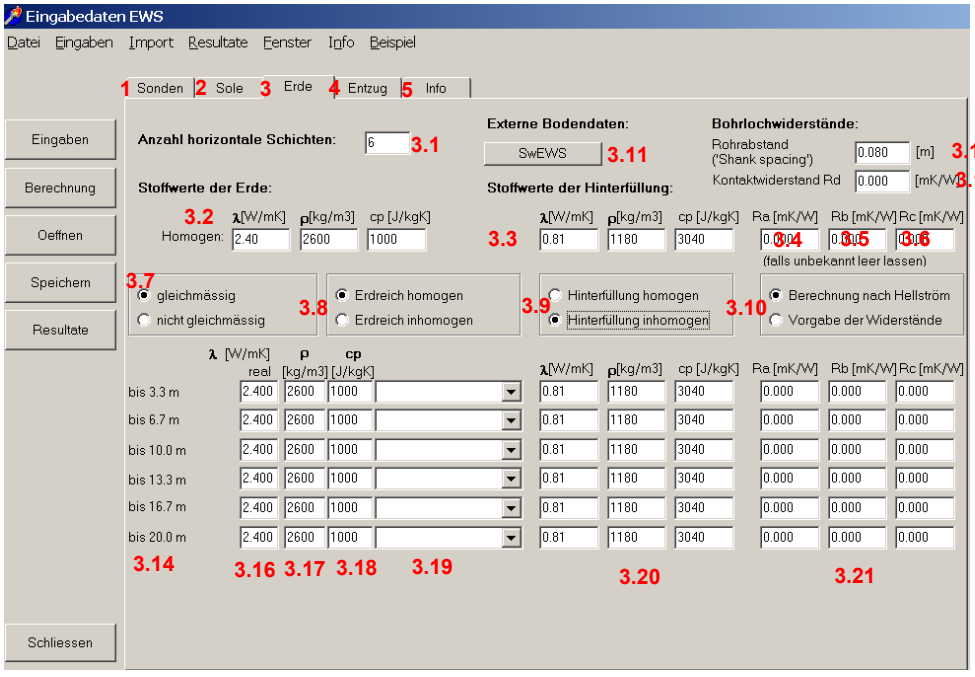


Abb. 3.27: Blatt „Erde“ mit zusätzlich inhomogener Hinterfüllung.

3.6.3 Eingabe der Stoffwerte für die Erde

Für jede horizontale Erdschicht erscheint eine Zeile mit den einzugebenden Stoffwerten. Die Stoffwerte können entweder direkt eingegeben werden (Feld 3.15 - 3.18), oder es können im Pulldown-Menü Gesteinsarten mit hinterlegten Stoffwerten ausgewählt werden (siehe Abb. 3.28).

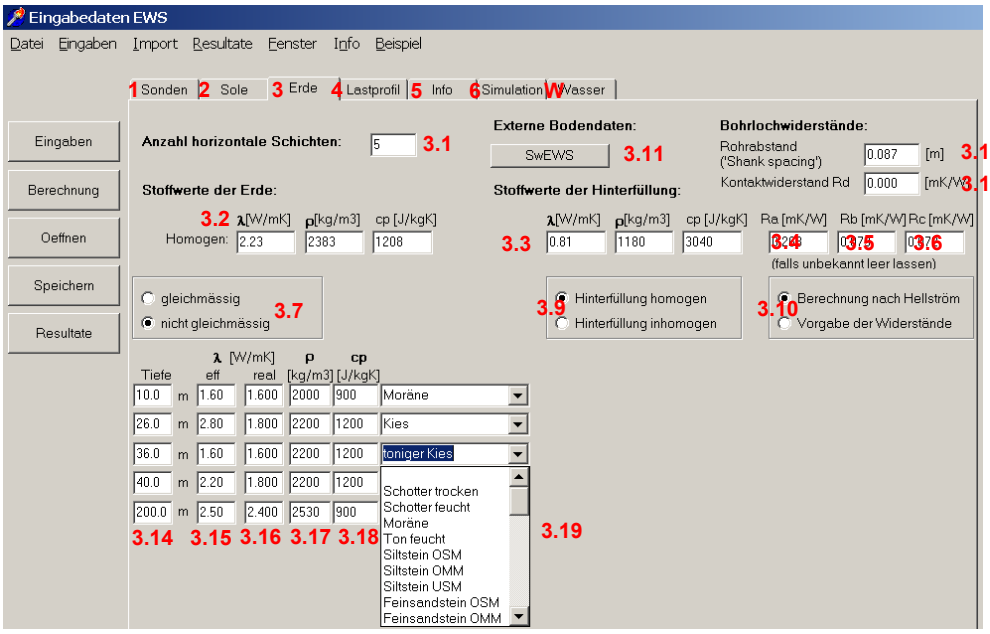


Abb. 3.28: Blatt „Erde“ mit Pulldown - Menü zur Auswahl der Gesteinsart für jede Erdschicht.

Auch die Eingabe eigener Gesteinsbezeichnungen ins Pulldown-Feld 3.19 ist möglich (Abb. 3.29).

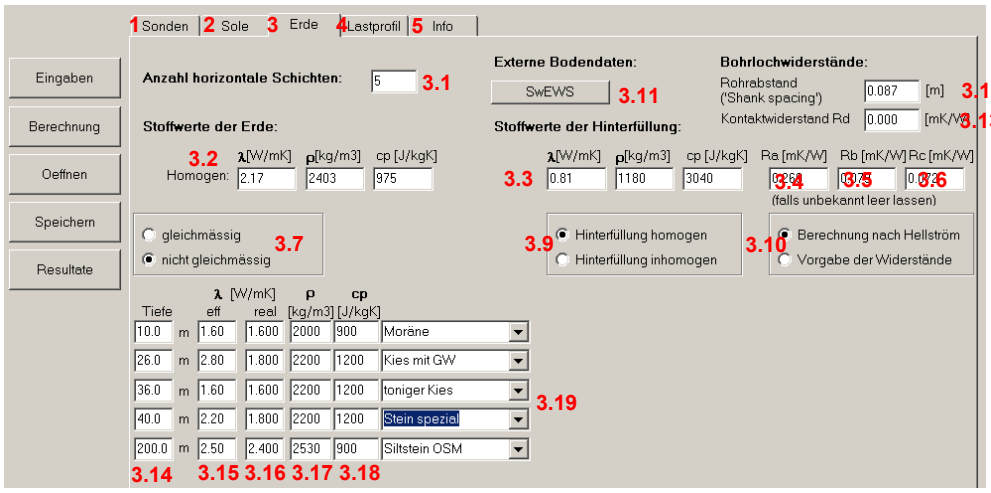

1 Sonden 2 Sole 3 Erde 4 Lastprofil 5 Info
Eingaben
Berechnung
Oeffnen
Speichern
Resultate
Anzahl horizontale Schichten: 5 3.1
Externe Bodendaten:
SwEWS 3.11
Bohrlochwiderstände:
Rohrabstand ('Shank spacing') 0.087 [m] 3.12
Kontaktwiderstand Rd 0.000 [mK/W] 3.13
Stoffwerte der Erde:
3.2 λ[W/mK] ρ[kg/m3] cp [J/kgK]
Homogen: 2.17 2403 975
Stoffwerte der Hinterfüllung:
3.3 0.81 1180 3040
Ra [mK/W] Rb [mK/W] Rc [mK/W]
3.4 3.5 3.6
(falls unbekannt leer lassen)
gleichmässig
nicht gleichmässig 3.7
3.9 Hinterfüllung homogen
Hinterfüllung inhomogen
3.10 Berechnung nach Hellström
Vorgabe der Widerstände
Tiefe λ [W/mK] eff real ρ [kg/m3] cp [J/kgK]
10.0 m 1.60 1.600 2000 900 Moräne
26.0 m 2.80 1.800 2200 1200 Kies mit GW
36.0 m 1.60 1.600 2200 1200 toniger Kies
40.0 m 2.20 1.800 2200 1200 Stein spezial
200.0 m 2.50 2.400 2530 900 Siltstein OSM
3.19
3.14 3.15 3.16 3.17 3.18

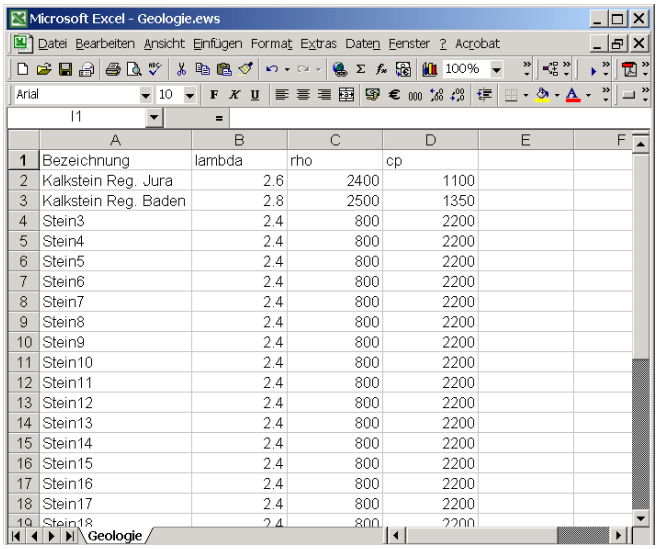
Abb. 3.29: Blatt „Erde“, Eingabe von eigenen Gesteinsbezeichnungen und Stoffwerten.

3.15 Sobald Grundwasser berücksichtigt werden soll und W1 auf dem Blatt „Wasser“ angewählt wurde, erscheint eine zusätzliche Kolonne 3.15 mit der „effektiven Wärmeleitfähigkeit“ λ_{eff}. λ_{eff} ist die scheinbar Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung des Grundwassereinflusses. λ_{eff} kann zum Beispiel mit einem Thermal Response Test (TRT) bestimmt werden, wohingegen λ_{real} (Wärmeleitfähigkeit ohne den Grundwassereinfluss) z.B. durch Messung an einer Gesteinsprobe ermittelt wird. Bei Grundwasser wird innerhalb des Simulationsradius mit λ_{eff} gerechnet, die g-functions hingegen werden immer mit λ_{real} berechnet, weil in diesem Bereich der Grundwassereinfluss separat berechnet wird.

3.6.4 Erstellen einer eigenen Bibliothek von Stoffwerten

Jeder Benutzer des Programms EWS kann eine eigene Bibliothek mit 30 verschiedenen Gesteinsarten und den entsprechenden Stoffwerten selbst erstellen, die dann bei jedem Programmstart automatisch eingelesen werden und im Pulldown 3.19 erscheinen. Dazu erstellt man in Excel eine Tabelle der Gesteinsarten und Stoffwerte (siehe Abb. 3.30). Die Gesteinsarten müssen direkt nach der Kopfzeile in die Zeilen 2-31 eingetragen werden. In die 1. Spalte kommt die Gesteinsbezeichnung, in die 2. Spalte deren λ-Wert, in die 3. Spalte der entsprechende ρ-Wert und in die 4. Spalte die Wärmekapazität des Gesteins. Im Beispiel wurden zwei verschiedene Kalksteintypen (Region Jura und Region Baden) eingetragen. Die Tabelle muss als **Text-Datei** (.txt) **im selben Ordner wie das EWS Programm** unter dem Namen „Geologie.txt“ gespeichert und dann in den Namen „Geologie.ews“ umbenannt werden. Nun stehen die in der Tabelle eingetragenen Gesteinsarten im Pull-Down-Menu zur Auswahl (siehe Abb. 3.31).

Achtung: Programm EWS akzeptiert nur den Dezimalpunkt (kein Komma).
Tipp: Windows Ländereinstellung auf Deutsch(Schweiz) umstellen.



	A	B	C	D
1	Bezeichnung	lambda	rho	cp
2	Kalkstein Reg. Jura	2.6	2400	1100
3	Kalkstein Reg. Baden	2.8	2500	1350
4	Stein3	2.4	800	2200
5	Stein4	2.4	800	2200
6	Stein5	2.4	800	2200
7	Stein6	2.4	800	2200
8	Stein7	2.4	800	2200
9	Stein8	2.4	800	2200
10	Stein9	2.4	800	2200
11	Stein10	2.4	800	2200
12	Stein11	2.4	800	2200
13	Stein12	2.4	800	2200
14	Stein13	2.4	800	2200
15	Stein14	2.4	800	2200
16	Stein15	2.4	800	2200
17	Stein16	2.4	800	2200
18	Stein17	2.4	800	2200
19	Stein18	2.4	800	2200

Abb. 3.30: Exel-Datenblatt mit eingefügten Gesteinsarten.

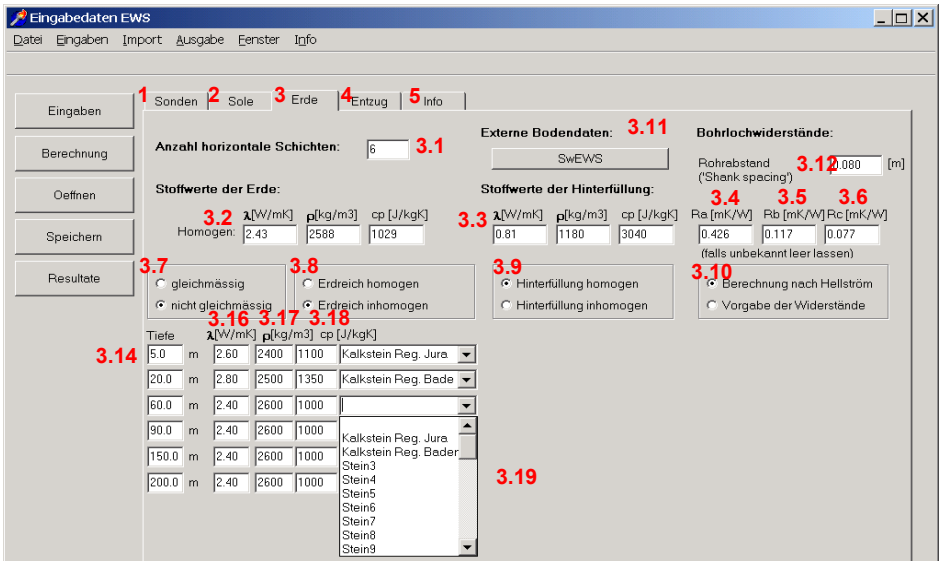


Abb. 3.31: Blatt „Erde“ mit selbst erstellter Auswahl an Gesteinsarten.

3.7 Blatt "Entzug"

Auf dem Blatt "Entzug" wird das Lastprofil für die Erdwärmesonde eingegeben (cf. Abb. 3.32).

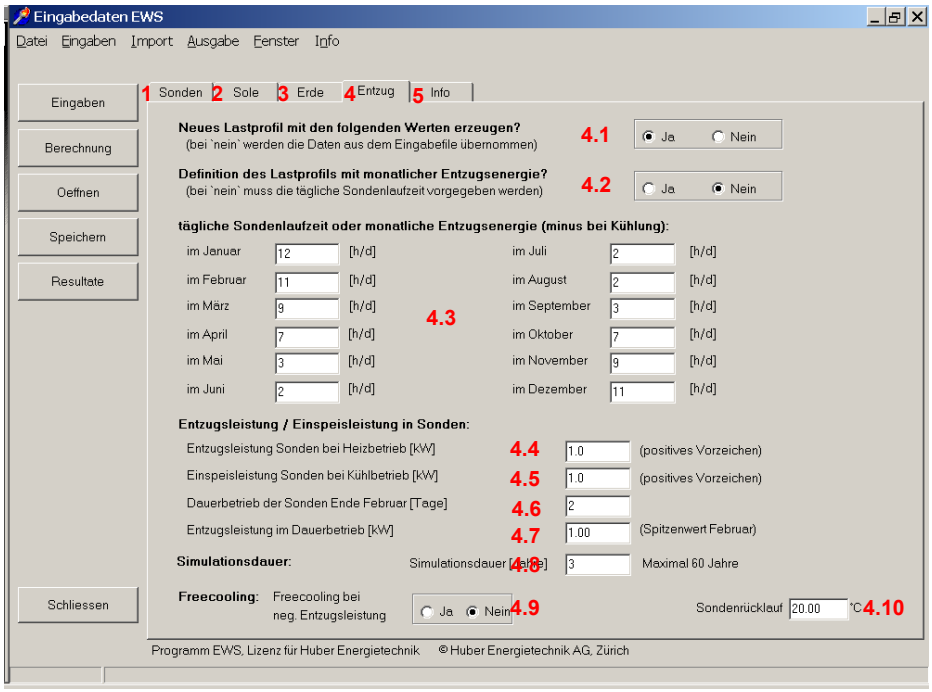

Eingabedaten EWS
Datei Eingaben Import Ausgabe Fenster Info
Eingaben
Berechnung
Oeffnen
Speichern
Resultate
Schliessen
1 Sonden 2 Sole 3 Erde 4 Entzug 5 Info
Neues Lastprofil mit den folgenden Werten erzeugen?
(bei 'nein' werden die Daten aus dem Eingabefile übernommen)
4.1
Ja Nein
Definition des Lastprofils mit monatlicher Entzugsenergie?
(bei 'nein' muss die tägliche Sondenlaufzeit vorgegeben werden)
4.2
Ja Nein
tägliche Sondenlaufzeit oder monatliche Entzugsenergie (minus bei Kühlung):
im Januar 12 [h/d]
im Februar 11 [h/d]
im März 9 [h/d]
im April 7 [h/d]
im Mai 3 [h/d]
im Juni 2 [h/d]
4.3
im Juli 2 [h/d]
im August 2 [h/d]
im September 3 [h/d]
im Oktober 7 [h/d]
im November 9 [h/d]
im Dezember 11 [h/d]
Entzugsleistung / Einspeisleistung in Sonden:
Entzugsleistung Sonden bei Heizbetrieb [kW] 4.4 1.0 (positives Vorzeichen)
Einspeisleistung Sonden bei Kühlbetrieb [kW] 4.5 1.0 (positives Vorzeichen)
Dauerbetrieb der Sonden Ende Februar [Tage] 4.6 2
Entzugsleistung im Dauerbetrieb [kW] 4.7 1.00 (Spitzenwert Februar)
Simulationsdauer: Simulationsdauer [Jahre] 4.8 3 Maximal 60 Jahre
Freecooling: Freecooling bei neg. Entzugsleistung
Ja Nein 4.9
Sondenrücklauf 20.00 °C 4.10
Programm EWS, Lizenz für Huber Energietechnik © Huber Energietechnik AG, Zürich

Abb. 3.32: Blatt „Entzug“ mit Eingabe der täglichen Sondenlaufzeiten.

4.1 Wird bei der Frage "Neues Lastprofil mit den folgenden Werten erzeugen" mit "Ja" geantwortet, so muss im Folgenden ein Lastprofil eingegeben werden. Bei "Nein" werden Default-Werte des Programms übernommen und eine eigene Eingabe des Lastprofils erübrigt sich.

4.2 Bei der Eingabe des Lastprofils kann zwischen der Eingabe von täglichen Sondenlaufzeiten und von monatlichen Entzugsenergien ausgewählt werden.

4.3 Wird in Feld 4.2 "nein" ausgewählt, so müssen in Feld 4.3 die täglichen Sondenlaufzeiten (je pro Monat unterschieden) eingegeben werden. Wird eine Erdwärmesonde zur Kühlung benutzt, d. h. Wärme der Sonde zugeführt, so müssen die Sondenlaufzeiten in den entsprechenden Monaten mit einem Minuszeichen versehen werden

4.11 Wird in Feld 4.2 "ja" ausgewählt, so müssen in Feld 4.11 (cf. Abb. 3.33) die monatlichen Entzugsenergien eingegeben werden. Auch bei dieser Option müssen Kühllasten mit einem Minuszeichen versehen werden.

4.4 Bei einer Nutzung der Sonde für Heizzwecke wird die Entzugsleistung der Sonde mit einem positiven Vorzeichen eingetragen. Wird die Entzugsleistung verändert, so wird in Feld 2.7 (im Blatt „Sole“) der Sondendurchsatz entsprechend angepasst (cf. Beschreibung unter Feld 2.6/2.7).

4.5 Bei einer Nutzung der Sonde für Kühlzwecke wird die Einspeisleistung der Sonde ebenfalls mit einem positiven Vorzeichen eingetragen.

4.6/4.7 Soll die maximale Belastung der Erdwärmesonde für Heizzwecke simuliert werden, so kann in Feld 4.6 die Dauer (Anzahl Tage) eingegeben werden, während der die Sonden Ende Februar (kälteste Jahreszeit) im Dauerbetrieb laufen, sowie in Feld 4.7 die Entzugsleistung während dieser Zeit (entspricht üblicherweise der Entzugsleistung unter Feld 4.4).

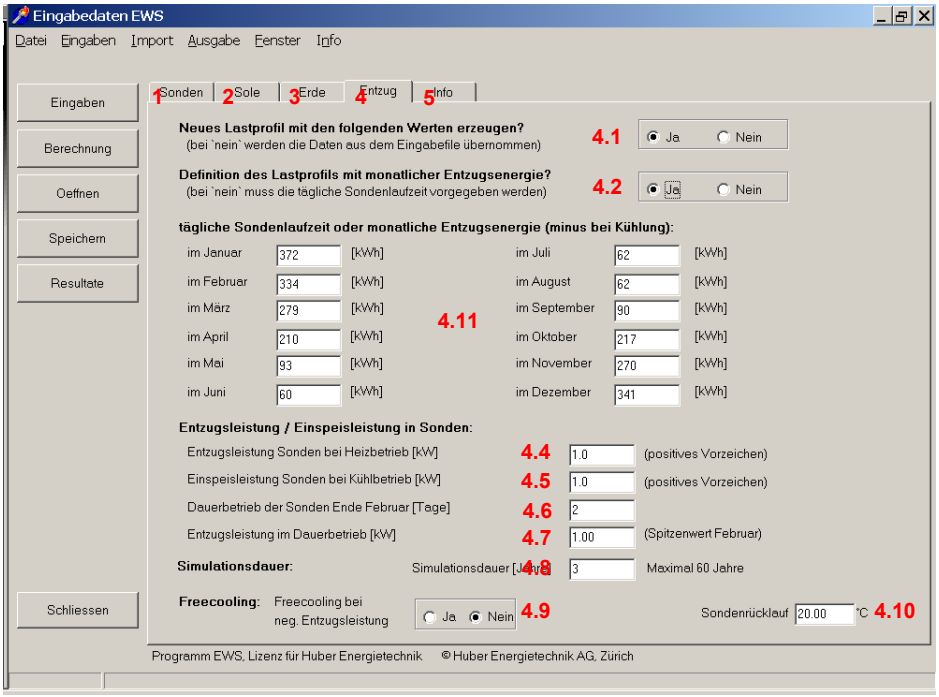

Eingabedaten EWS
Datei Eingaben Import Ausgabe Fenster Info
Eingaben
Berechnung
Oeffnen
Speichern
Resultate
Schliessen
1 Sonden 2 Sole 3 Erde 4 Entzug 5 Info
Neues Lastprofil mit den folgenden Werten erzeugen?
(bei `nein` werden die Daten aus dem Eingabefile übernommen)
4.1 Ja Nein
Definition des Lastprofils mit monatlicher Entzugsenergie?
(bei `nein` muss die tägliche Sondenlaufzeit vorgegeben werden)
4.2 Ja Nein
tägliche Sondenlaufzeit oder monatliche Entzugsenergie (minus bei Kühlung):
im Januar 372 [kWh]
im Februar 334 [kWh]
im März 279 [kWh]
im April 210 [kWh]
im Mai 93 [kWh]
im Juni 60 [kWh]
im Juli 62 [kWh]
im August 62 [kWh]
im September 90 [kWh]
im Oktober 217 [kWh]
im November 270 [kWh]
im Dezember 341 [kWh]
4.11
Entzugsleistung / Einspeisleistung in Sonden:
Entzugsleistung Sonden bei Heizbetrieb [kW] 4.4 1.0 (positives Vorzeichen)
Einspeisleistung Sonden bei Kühlbetrieb [kW] 4.5 1.0 (positives Vorzeichen)
Dauerbetrieb der Sonden Ende Februar [Tage] 4.6 2
Entzugsleistung im Dauerbetrieb [kW] 4.7 1.00 (Spitzenwert Februar)
Simulationsdauer: Simulationsdauer [Jahre] 4.8 3 Maximal 60 Jahre
Freecooling: Freecooling bei neg. Entzugsleistung Ja Nein 4.9
Sondenrücklauf 20.00 °C 4.10
Programm EWS, Lizenz für Huber Energietechnik © Huber Energietechnik AG, Zürich

Abb. 3.33: Blatt „Entzug“ mit Eingabe der monatlichen Entzugsenergie.

4.9 /10 Das Feld 4.9 aktiviert eine Temperaturbegrenzung des Sondenrücklaufs nach oben (Maximalwert) auf den im Feld 4.10 eingegebenen Wert. Überschreitet die Sonden-Rücklauftemperatur diesen Wert, so reduziert das Programm EWS die Kühlleistung bis die maximale Sonden-Rücklauftemperatur wieder eingehalten ist. Auf der Leistungs–Ausgabegrafik wird dann die gewünschte Leistung violett dargestellt, und die erbrachte Kühlleistung grün und auf dem Resultatblatt der „Deckungsbeitrag Kühlung mit Erdsonden“ für das letzte Simulationsjahre angegeben. Die Funktion ist identisch mit dem Feld 10.28 und Feld 10.29 auf dem Blatt „Lastprofil“.

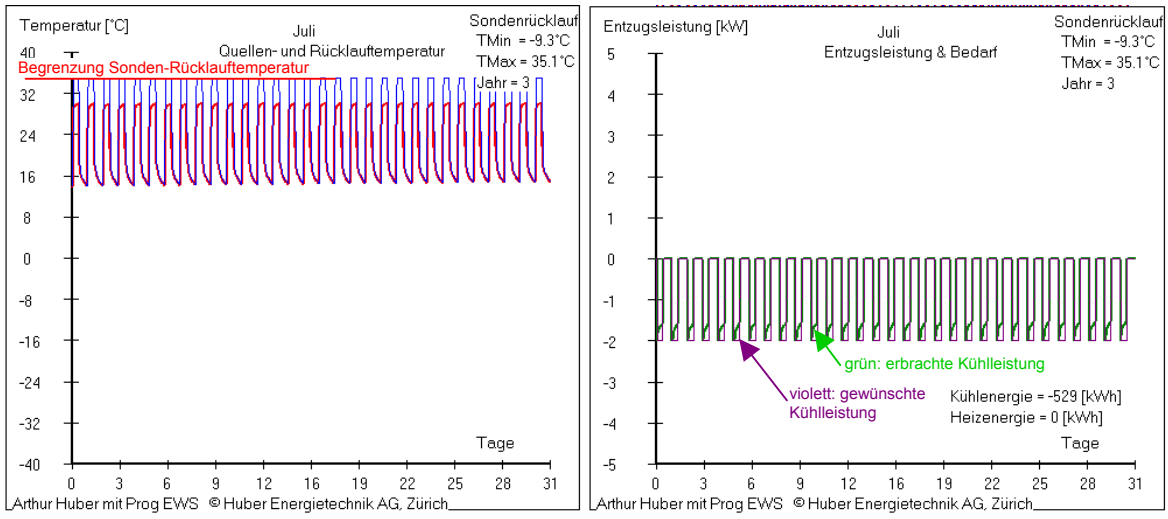


Abb. 3.34: Begrenzung der maximalen Sonden-Rücklauftemperatur im Kühlfall.

3.8 Blatt "Lastprofil"

Als Alternative zum Blatt „Entzug“(Kapitel 3.7), bei dem die Sondenbelastung direkt eingegeben werden muss, kann ***in der Vollversion*** des Programms EWS auch das Blatt „Lastprofil“ verwendet werden. Auf dem Blatt „Lastprofil“ wird die benötigte, monatliche Endenergie definiert und mit Hilfe der COP-Werte vom Programm direkt in eine Sondenbelastung umgerechnet. Dazu wird zunächst in der Menü-Zeile unter der Rubrik „Eingaben“ das Blatt „Lastprofil“ angewählt (cf.

Abb. 3.33). Das Blatt „Lastprofil“ kann nicht mit dem Blatt „Wärmepumpe“ kombiniert werden.

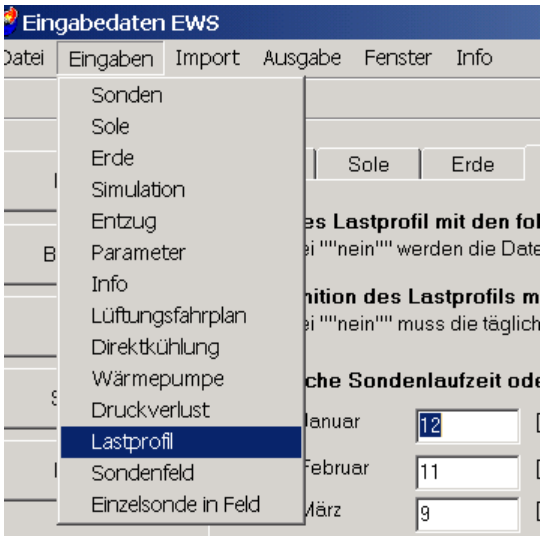


Abb. 3.35: Öffnen des Blatts „Lastprofil“ (nur in Vollversion).

Darauf erscheint das Blatt „Lastprofil“ (Abb. 3.36) und das Blatt „Entzug“ wird ausgeblendet.

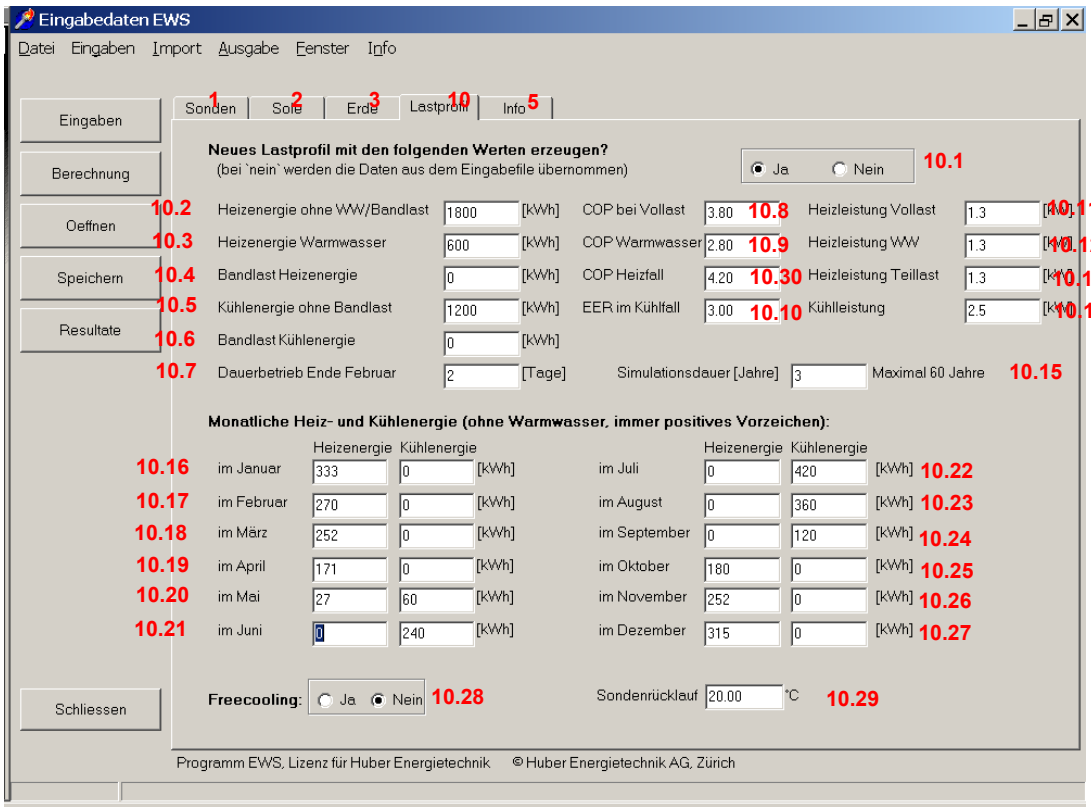

Eingabedaten EWS
Datei Eingaben Import Ausgabe Fenster Info
Eingaben
Berechnung
Oeffnen
Speichern
Resultate
Schliessen
Sonden
Sole
Erde
Lastprofil
Info
Neues Lastprofil mit den folgenden Werten erzeugen?
(bei `nein` werden die Daten aus dem Eingabefile übernommen)
Ja
Nein
10.1
10.2 Heizenergie ohne WW/Bandlast 1800 [kWh]
10.3 Heizenergie Warmwasser 600 [kWh]
10.4 Bandlast Heizenergie 0 [kWh]
10.5 Kühlenergie ohne Bandlast 1200 [kWh]
10.6 Bandlast Kühlenergie 0 [kWh]
10.7 Dauerbetrieb Ende Februar 2 [Tage]
COP bei Vollast 3.80 10.8
COP Warmwasser 2.80 10.9
COP Heizfall 4.20 10.30
EER im Kühlfall 3.00 10.10
Simulationsdauer [Jahre] 3
Maximal 60 Jahre 10.15
Heizleistung Vollast 1.3 10.11
Heizleistung WW 1.3 10.12
Heizleistung Teillast 1.3 10.13
Kühlleistung 2.5 10.14
Monatliche Heiz- und Kühlenergie (ohne Warmwasser, immer positives Vorzeichen):
Heizenergie Kühlenergie
10.16 im Januar 333 0 [kWh]
10.17 im Februar 270 0 [kWh]
10.18 im März 252 0 [kWh]
10.19 im April 171 0 [kWh]
10.20 im Mai 27 60 [kWh]
10.21 im Juni 0 240 [kWh]
im Juli 0 420 [kWh] 10.22
im August 0 360 [kWh] 10.23
im September 0 120 [kWh] 10.24
im Oktober 180 0 [kWh] 10.25
im November 252 0 [kWh] 10.26
im Dezember 315 0 [kWh] 10.27
Freecooling: Ja Nein 10.28
Sondenrücklauf 20.00 °C 10.29
Programm EWS, Lizenz für Huber Energietechnik © Huber Energietechnik AG, Zürich

Abb. 3.36: Blatt „Lastprofil“ mit Eingabe des monatlichen Endenergiebedarfs.

Auf dem Blatt „Lastprofil“ wird der monatlichen Heiz- und Kühlenergiebedarf definiert. Im Gegensatz zum Blatt „Entzug“ sind auf dem Blatt „Lastprofil“ sowohl der Heizenergie- als auch der Kühlenergiebedarf in kWh mit **positivem Vorzeichen** einzugeben. Das Programm EWS berechnet aus dem Lastprofil, unter Berücksichtigung der COP und der Heiz- und Kühlleistung ein taktendes Lastprofil. Davon ausgenommen ist die Bandlast (**10.4** und **10.6**), die unabhängig von der installierten Heiz- und Kühlleistung ins Lastprofil einfliesst. Im Heizfall wird die Sondenbelastung um die Kompressorleistung reduziert, die sich aus dem COP berechnet. Im Kühlfall wird die Rückkühlleistung um die Kompressorleistung erhöht, die sich aus dem EER berechnet.

Der Sondendurchsatz wird jeweils so gewählt, dass die Temperaturdifferenz in **2.7** eingehalten ist (d.h. variabler Sondendurchsatz).

10.1 Wird bei der Frage "Neues Lastprofil mit den folgenden Werten erzeugen" mit "Ja" geantwortet, so wird das Lastprofil aus 10.2 – 10.27 berechnet. Bei "Nein" wird das Lastprofil aus dem Eingabefile übernommen und die Eingaben 10.2-10.29 nicht beachtet.

10.7 Dauer des Vollastfalles (Dauerbetrieb) Ende Februar in Tagen. Entspricht Auslegungsfall.

10.8 COP der Wärmepumpe im Auslegungsfall (Vollastfall, **10.11**).

10.10 Eingabe des EER der Kältemaschine (= Kälte-COP_C, d.h. Verhältnis von Kühlenergie zu Stromaufnahme). Wird die Freecooling-Option unter **10.28** angewählt so, so ist hier ein hoher Wert (z.B. 999) einzusetzen.

10.11 Leistung im Auslegungsfall, Ende Februar. Die Dauer wird in **10.7** definiert.

10.13 Leistung im Teillastfall. Diese Leistung wird so gerundet, dass die Gesamt-Heizenergie in 10.16 – 10.27 eingehalten werden kann.

10.15 Dauer der Simulation (maximal 100 Jahre). Ausgewertet wird jeweils das letzte Simulationsjahr.

10.28 Bei Auswahl der Freecooling – Option wird die Kühlleistung durch den Sondenrücklauf begrenzt. Eine etwaige Unterdeckung ist auf dem Resultatblatt ersichtlich. Die Funktion kann auch benutzt werden, um bei aktiver Kühlung die Sonden-Rücklauftemperatur zu begrenzen.

10.29 Temperatur des Sondenrücklaufs im Freecooling – Fall. **Achtung**: Rücklauftemperatur in Sonde ist meist tiefer als Rücklauftemperatur des Kühlkreislaufes (wegen Wärmetauscher).

10.30 Mittlerer COP im Heizfall (Teillastfall, **10.13)**

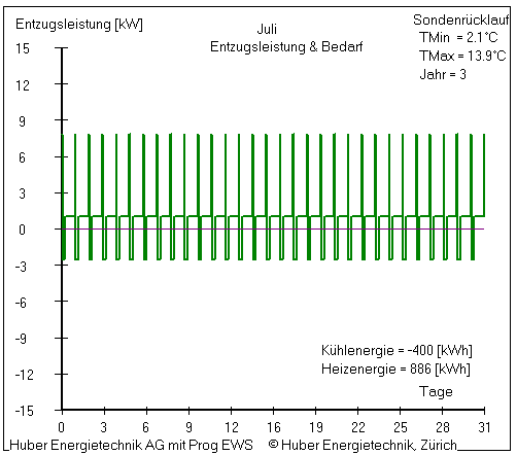


Abb. 3.37: Taktendes Leistungsprofil, erzeugt mit dem Blatt „Lastprofil“.

3.9 Blatt "Simulation"

3.9.1 Einblenden des Blattes “Simulation”

Um spezielle Berechnungen durchführen zu können, kann das Blatt „Simulation“ eingeblendet werden. Dazu wird zunächst in der Menü-Zeile unter der Rubrik „Fenster“ das Blatt „Simulation“ angewählt (cf. Abb. 3.38)

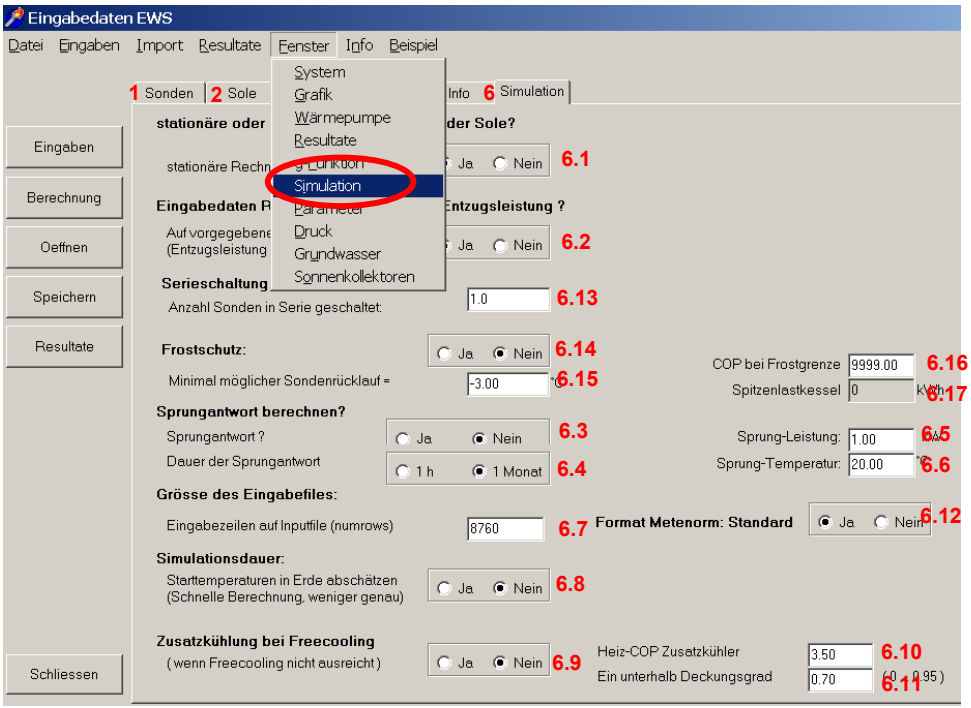


Abb. 3.38: Einblenden des Blattes „Simulation“.

Auf dem Blatt „Simulation“ können nun die folgenden, speziellen Berechnungen durchgeführt werden:

- Instationäre oder stationäre Berechnung des Sondenfluids (Feld 6.1). In der Default-Einstellung wird das Sondenfluid stationär berechnet (siehe ref. [5], [6]).
- Eingabe von Entzugsleistungen, die z.B. von einer Wärmepumpe erzwungen werden oder von Sonden-Rücklauftemperaturen (z.B. bei der Sonden-Direktkühlung). Dazu wird die entsprechende Wahl in Feld 6.2 gemacht. In der Default-Einstellung wird die Entzugsleistung mit einer Wärmepumpe erzwungen und das Programm berechnet daraus die notwendigen Quellen- und Sonden-Rücklauftemperaturen.
- Berechnung von Sprungantworten (Response-Test, Feld 6.3). Details dazu sind in Kapitel 0 zu finden.
- Grösse des Eingabefiles (Feld 6.7). In den Default-Einstellungen wird mit 8760 Schritten von 60 Minuten gerechnet. Es ist aber auch möglich, weniger als ein Jahr nachzurechnen und ein entsprechend kleineres Eingabefile zu verarbeiten.
- Starttemperaturen abschätzen (Feld 6.8). Diese Option führt zu etwas kürzeren Rechenzeiten bei langen Simulationszeiten (>10 Jahre), die Resultate sind aber ungenauer. Diese Option sollte nur für schnelle Grobabschätzungen verwendet werden.

3.9.2 Eingabe von Entzugsleistungen oder Sonden-Rücklauftemperaturen

Wird in Feld 6.2 „nein“ angewählt (d.h. die Entzugsleistung wird nicht durch eine Wärmepumpe erzwungen), so wird die Rücklauftemperatur aus Feld 6.6 oder Feld 4.10 als Ausgangslage für die Berechnung genommen und das Programm berechnet daraus die möglichen Entzugsleistungen

3.9.3 Aktive Zusatzkühlung wenn das Sonden-Freecooling nicht ausreicht

Wird in Feld 6.9 die aktive Zusatzkühlung angewählt, so werden die Erdwärmesonden als Rückkühlung für eine Kältemaschine verwendet, sobald der Deckungsgrad nur mit der Freecooling-Option unter die Grenze von Feld 6.11 fällt. Dabei müssen die Erdsonden zusätzlich die Kompressorleistung der Kältemaschine aufnehmen, die mit dem Heiz-COP (= EER + 1) der Kältemaschine von Feld 6.10 berechnet wird.

3.9.4 Serieschaltung von Erdwärmesonden oder Energiepfählen

Bei kurzen Erdwärmesonden oder Energiepfählen kann es vorkommen, dass bei einer parallelen Ankoppelung eine laminare Strömung entsteht, was die Leistungsfähigkeit stark reduzieren kann. Um dies zu vermeiden, werden in der Praxis dann häufig mehrere Erdwärmesonden oder Energiepfähle in Serie geschaltet. Dies erhöht den Durchsatz entsprechend. Dies wird im Programm EWS im Feld 6.13 mit der Eingabe der Anzahl Sonden, die jeweils in Serie geschaltet sind, berücksichtigt und nachgebildet.

3.9.5 Frostschutz (minimale Sondentemperatur) und bivalente Anlagen

Um Anlagen mit Frostschutzschaltungen und bivalente Anlagen simulieren zu können, wird Feld 6.14 auf „Ja“ gesetzt und es wird auf Feld 6.15 eine minimale Sonden-Rücklauftemperatur definiert. Unterschreitet die Sonden-Rücklauftemperatur den Wert in Feld 6.15, so reduziert die Wärmepumpe die Leistung bis die der Wert von 6.15 wieder eingehalten ist. Die fehlende Wärme wird dann durch eine seriell nachgeschaltete Zusatzheizung erbracht. Um die fehlende Wärme und den notwendigen Bedarf an Zusatzheizung berechnen zu können, muss in Feld 6.16 der COP der Wärmepumpe kurz vor dem Ausschalten angegeben werden. In Feld 6.17 wird nach dem Rechengang ausgegeben, wie gross der Heizwärmebedarf war, der nicht gedeckt werden konnte.

3.9.6 Response - Test

Um einen Response-Test nachzurechnen, muss in einem ersten Schritt das Blatt „Simulation“ eingeblendet werden. Dazu wird zunächst in der Menü-Zeile unter der Rubrik „Fenster“ das Blatt „Simulation“ angewählt (cf. Abb. 3.38)

Auf dem Blatt "Simulation" kann nun im Feld 6.3 die Sprungantwort angewählt werden. Sobald dies gemacht wurde, werden automatisch verschiedene Default-Einstellungen geändert:

- Sinnvolle Resultate von Sprung-Antwortberechnungen sind nur möglich, wenn das Sondenfluid instationär berechnet wird. Feld 6.1 wird deshalb auf „nein“ gesetzt.
- Bei Sprung-Antwortberechnungen muss mit der maximalen Anzahl Erdschichten gerechnet werden. Die Anzahl der horizontalen Schichten im Erdreich (Dimaxi, Feld 3.1) wird deshalb auf 10 gesetzt.

- Die Simulationszeitschritte für die Berechnung der Sole und des Erdreichs werden reduziert. Dazu werden der Zeitschritt-Faktor der Sole (Feld 7.5, „Sicherheit 1“) von 4 auf 40 und der Zeitschritt-Faktor der Erde (Feld 7.6, „Sicherheit 2“) von 2 auf 20 erhöht.
- Wurde die Dauer der Sprungantwort auf 1 h gesetzt (Feld 6.4), so wird der Zeitschritt der Sonde (Feld 7.4) auf 1 Minute gesetzt.
- Die Grösse des Eingabefiles in Feld 6.7 wird auf die Dauer der Sprungantwort angepasst.

Beim klassischen Response-Test wird dem Erdreich eine konstante Wärmeleistung entzogen oder zugeführt. Diese Leistung ist im Feld 6.5 einzugeben. Dabei ist die Vorzeichen-Konvention zu beachten:

- Positives Vorzeichen: -> Wärmeentzug aus Erdreich
- Negatives Vorzeichen: -> Wärmeeintrag ins Erdreich

Die Sprung-Temperatur (Feld 6.6) wird bei dieser Art des Response-Tests nicht berücksichtigt.

Nicht vergessen werden darf, den richtigen Sondendurchsatz in Feld 2.7 einzustellen.

In Abb. 3.39 ist eine Sprungantwort einer Sonde für die ersten 60 Minuten dargestellt (40mm Doppel-U-Sonde, 150m tief, 0.7 kg/s Durchsatz mit 33% Monoethylenglykol, bei einem Wärmeeintrag von 10 kW). Deutlich sichtbar ist das erste Temperaturmaximum nach 6.5 Minuten (halbe Durchlaufzeit des Sondenfluids), das sich aus dem „Kolbeneffekt“ des Sondenfluids ergibt.

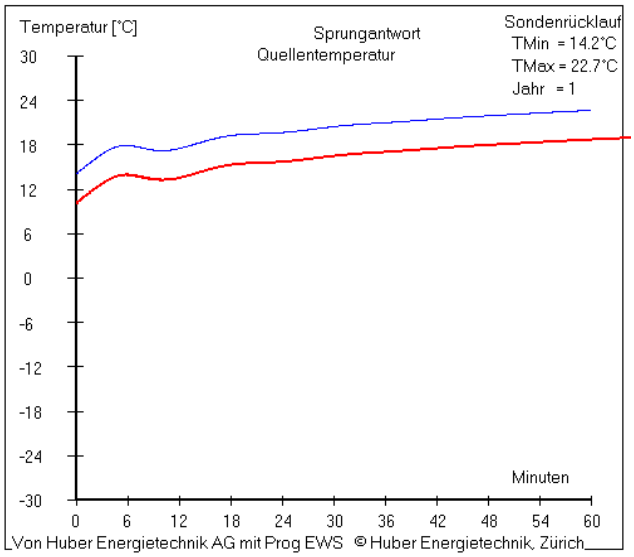


Abb. 3.39: Beispiel einer Sprungantwort einer Sonde in der ersten Stunde.

Es gibt noch eine 2. Variante des Response-Tests, die eher selten angewendet wird. Dabei wird eine konstante Sonden-Rücklauftemperatur in die Erdwärmesonde gebracht und es wird die Quellentemperatur und die Sondenleistung beobachtet. Bei dieser Variante ist das Feld 6.2 („auf vorgegebene Leistung iterieren?“) auf „nein“ zu setzen und im Feld 6.6 ist die konstante Sonden-Rücklauftemperatur einzugeben. Bei dieser Variante wird die Sprung-Leistung (Feld 6.5) vom Programm nicht beachtet.

3.10 Blatt „Wasser“ (Grundwassereinfluss)

Das Blatt „Wasser“ steht nur in der **Pro-Version** zur Verfügung. damit kann der Grundwasserfluss (GW) im Erdreich und die Jahreszeitenschwankungen an der Oberfläche berücksichtigt werden. Das Blatt „Wasser“ wird in der Menü-Zeile unter der Rubrik „Fenster“ eingeblendet.

Das Programm EWS verwendet ein Bilanz-Modell für die Berücksichtigung des Grundwasser-flusses. Dazu wird zunächst der Strömungsquerschnitt im Einflussbereich der Erdwärmesonden bestimmt. Dafür muss auf dem Blatt „Sondenanordnung“ die Flussrichtung des Grundwassers angegeben werden. Dies geschieht durch die Eingabe von zwei Isohypsen-Geraden der Grundwasser-Oberkante. Das Grundwasser fliesst in der Regel senkrecht zu den Isohypsen der Grundwasser-Oberkante. Durch Drücken des Buttons S27 erscheint das Feld S28, auf dem die absolute Höhe der ersten Isohypse eingegeben werden kann. Danach kann durch die Auswahl von 2 Punkten mit der linken Maustaste die Isohpsen-Gerade gezeichnet werden. Durch Klicken mit der Maus irgendwo auf dem Blatt wird die Aktion abgeschlossen. Der Vorgang wird für die 2. Isohypse mit dem Button S29 und dem Feld S30 wiederholt. Sind die beiden Isohypsen-Geraden nicht parallel, so berechnet das Programm EWS den Strömungsquerschnitt auf der Winkelhalbierenden dieser beiden Geraden und die Strömungsrichtung senkrecht dazu. Die Erdwärmesonden werden nun im Programm EWS darauf senkrecht projiziert und der grösste Abstand bestimmt. Dieser Abstand plus 4m, multipliziert mit der Schichtdicke der Grundwasser-führenden Schichten (Feld W16 – W19), ergibt dann die Strömungs-Querschnittsfläche des Grundwassers, die das Sondenfeld beeinflusst. Das Programm EWS geht davon aus, dass die Temperatur des zuströmende Wasser immer gleich der unbeeinflussten Erdreichtemperatur der entsprechenden Tiefe ist. Am äusseren Rand des Simulationsgebietes (cf. Kapitel 6.1) wird dann die Energiebilanz gebildet und die mittlere Erdreichtemperatur unter Berücksichtigung der Summe des Wärmeentzugs der Sonden und der netto zuströmenden Wärme des Grundwasser mit Hilfe der g-functions berechnet (cf. Gl. 6.21). Entsprechend diesem Modell wird innerhalb des Simulationsradius mit der effektiven Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} gerechnet (mit GW, Eingabe im Feld 3.15, cf. Kapitel 3.6.3), für die Randbedingungen aber mit λ_{real} (ohne GW, Eingabe im Feld 3.16).

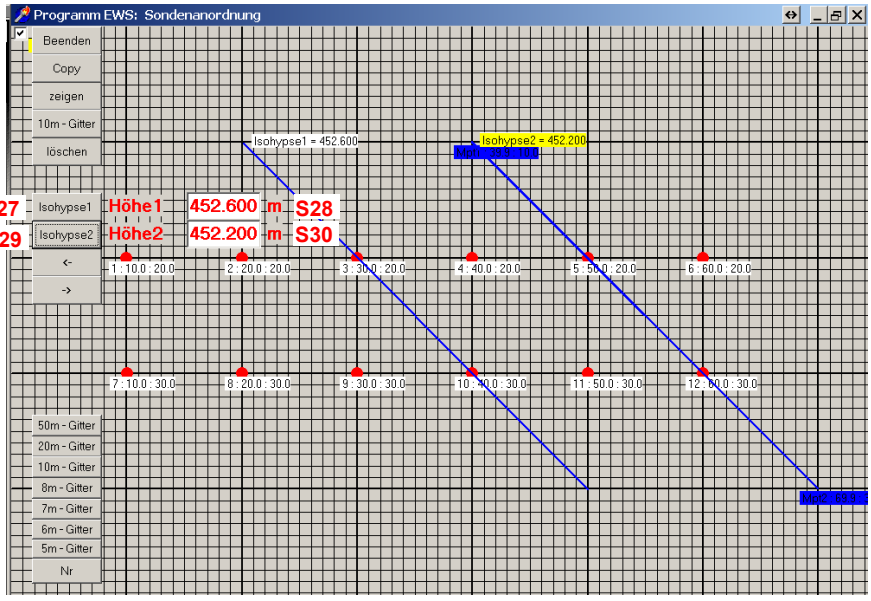


Abb. 3.40: Eingabe der Grundwasser-Oberkante mit Hilfe der Isohypsen auf dem Blatt „Sondenanordnung“.

Achtung: Der Grundwassereinfluss ist nicht mit anwendbar, wenn Nachbarsonden (cf. Kapitel 3.3.5) definiert wurden.

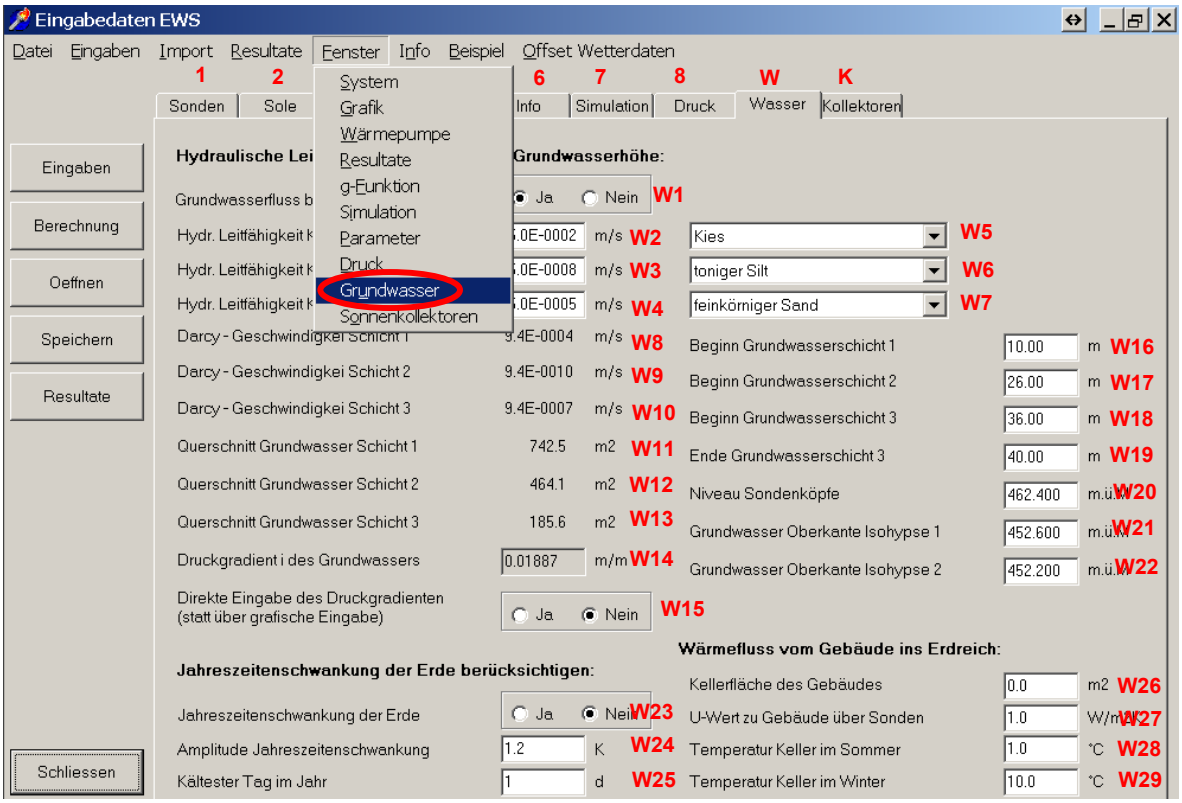
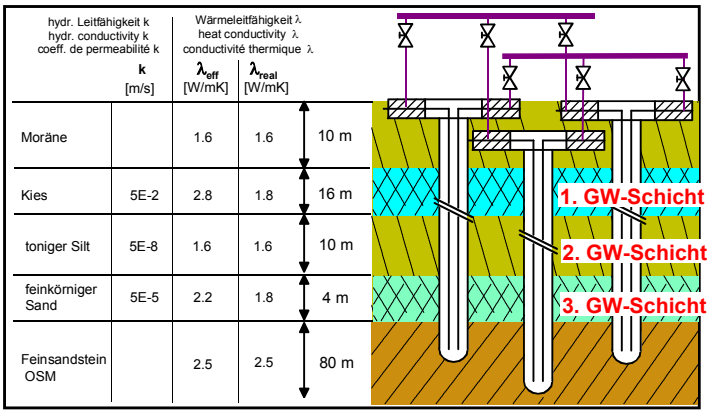

Eingabedaten EWS
Datei Eingaben Import Resultate Fenster Info Beispiel Offset Wetterdaten
1 2 6 7 8 W K
Sonden Sole Info Simulation Druck Wasser Kollektoren
System
Grafik
Wärmepumpe
Resultate
g-Funktion
Simulation
Parameter
Druck
Grundwasser
Sonnenkollektoren
Eingaben
Berechnung
Oeffnen
Speichern
Resultate
Schliessen
Hydraulische Lei
Grundwasserhöhe:
Grundwasserfluss b
Ja Nein W1
Hydr. Leitfähigkeit k 0E-0002 m/s W2 Kies W5
Hydr. Leitfähigkeit k 0E-0008 m/s W3 toniger Silt W6
Hydr. Leitfähigkeit k 0E-0005 m/s W4 feinkörniger Sand W7
Darcy - Geschwindigkeit Schicht 1 9.4E-0004 m/s W8 Beginn Grundwasserschicht 1 10.00 m W16
Darcy - Geschwindigkeit Schicht 2 9.4E-0010 m/s W9 Beginn Grundwasserschicht 2 26.00 m W17
Darcy - Geschwindigkeit Schicht 3 9.4E-0007 m/s W10 Beginn Grundwasserschicht 3 36.00 m W18
Querschnitt Grundwasser Schicht 1 742.5 m2 W11 Ende Grundwasserschicht 3 40.00 m W19
Querschnitt Grundwasser Schicht 2 464.1 m2 W12 Niveau Sondenköpfe 462.400 m.ü.M. W20
Querschnitt Grundwasser Schicht 3 185.6 m2 W13 Grundwasser Oberkante Isohypse 1 452.600 m.ü.M. W21
Druckgradient i des Grundwassers 0.01887 m/m W14 Grundwasser Oberkante Isohypse 2 452.200 m.ü.M. W22
Direkte Eingabe des Druckgradienten (statt über grafische Eingabe) Ja Nein W15
Wärmefluss vom Gebäude ins Erdreich:
Jahreszeitenschwankung der Erde berücksichtigen:
Kellerfläche des Gebäudes 0.0 m2 W26
Jahreszeitenschwankung der Erde Ja Nein W23
U-Wert zu Gebäude über Sonden 1.0 W/mK W27
Amplitude Jahreszeitenschwankung 1.2 K W24 Temperatur Keller im Sommer 1.0 °C W28
Kältester Tag im Jahr 1 d W25 Temperatur Keller im Winter 10.0 °C W29

Abb. 3.41: Blatt „Wasser“ zur Berücksichtigung von Grundwasser und Jahreszeitenschwankungen.

W1 Der Grundwassereinfluss wird nur berücksichtigt, wenn die Option Grundwasser (W1) gesetzt wurde.

W2–W7 Die hydraulische Leitfähigkeit k_f (=Durchlässigkeitsbeiwert) ist eine Stoffeigenschaft der grundwasserführenden Schicht. Die Pulldown-Menüs W5-W7 geben typische Vorschlagswerte, gerechnet wird aber immer mit den Werten in W2 – W4.

W16-W19 Die grundwasserführenden Schichten werden als Tiefe unter Terrain in W16 – W19 eingegeben. Es wird davon ausgegangen, dass die Erde bis zur ersten Grundwasserschicht ohne Wasser ist. Das Beispiel rechts zeigt die Situation, die in Abb. 3.41 eingegeben wurde:



W23-W25 Die Jahreszeitenschwankungen der Erdoberfläche können optional zugeschaltet werden. Dies kann bei starker Grundwasserströmung und bei untiefen Sonden und Energiepfählen Sinn machen. In diesem Fall wird die Erdreichtemperatur in Abhängigkeit der Tiefe z wie folgt korrigiert:

$$T = T_{mo} - \Delta T_o \cdot \exp\left(-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot t_a}}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{t_a} t - z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot t_a}}\right) \qquad \text{Gl. 3.3}$$

W26-29 Soll der Wärmefluss eines Gebäudes über Energiepfählen gemäss Gl. 6.21 berücksichtigt werden, sind die Felder W26 – W29 auszufüllen.

3.11 Blatt „Kollektoren“ (solare Sondenregeneration)

Das Blatt „Kollektoren“ steht nur in der Pro-Version zur Verfügung. Damit kann die solare Sondenregeneration gemäss dem Schema Abb. 3.42 berechnet werden.

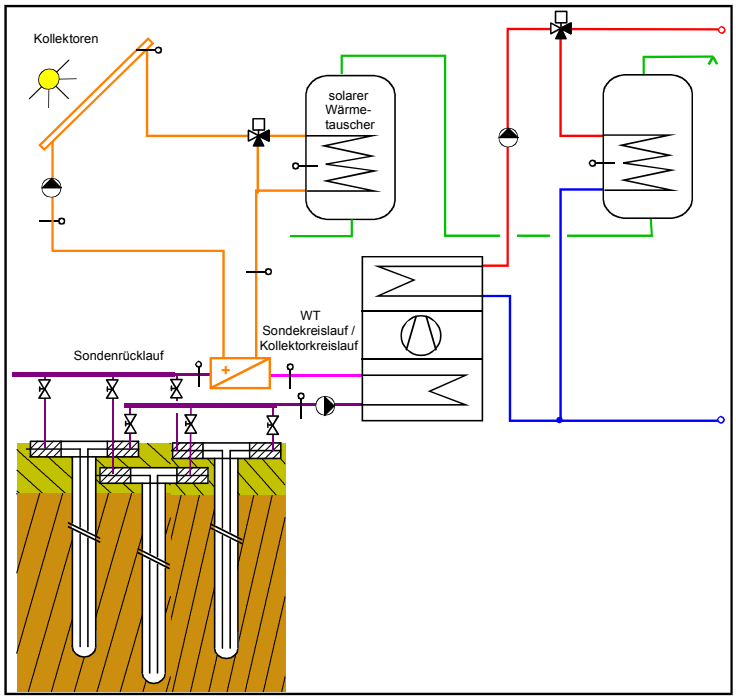


Abb. 3.42: Schema der solaren Sondenregeneration

Der Solarertrag der Kollektoren wird dabei stündlich unter Berücksichtigung des Wärmepumpenbetriebs und der Sondentemperaturen neu berechnet.

Zur Auswahl der Wetterdaten (Solarstrahlung und Lufttemperatur), Kollektor-Neigung, Azimut und der Horizont-Verschattung kann das Standard-Format der Meteo-Norm [17] mit dem Button K12 eingelesen werden. In diesem Fall werden die Daten aus der Meteo-Norm (im Standard-Format) ausgelesen und die Felder K8 und K9 verschwinden auf dem Eingabeblatt „Kollektoren“. Die Wetterdaten beeinflussen nur den Solarertrag, nicht aber das Lastprofil der Wärmepumpe.

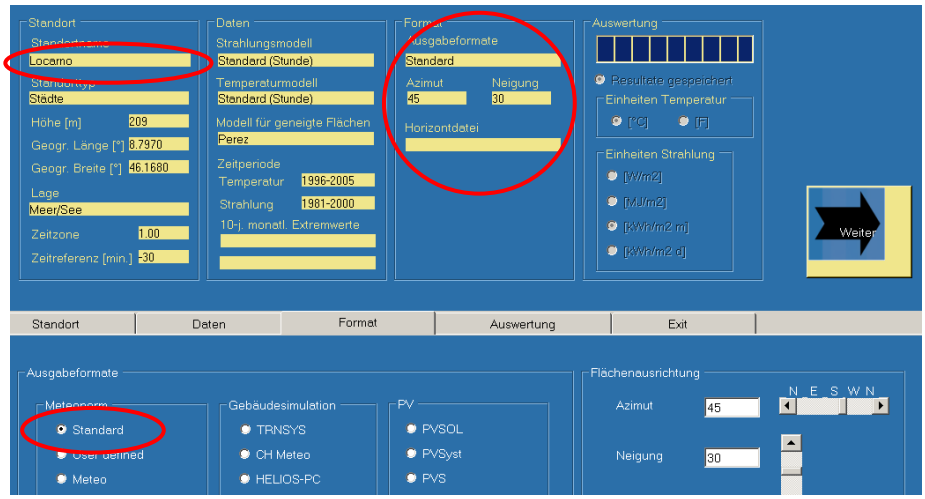


Abb. 3.43: Eingabe der Wetterdaten, Azimut, Neigung und Horizont im Programm METEONORM [17]

Werden keine Meteo-Daten eingelesen, ist standardmässig der DRY-Datensatz Zürich SMA hinterlegt. Azimut und Neigung der Kollektoren müssen dann in K8 und K9 eingelesen werden.

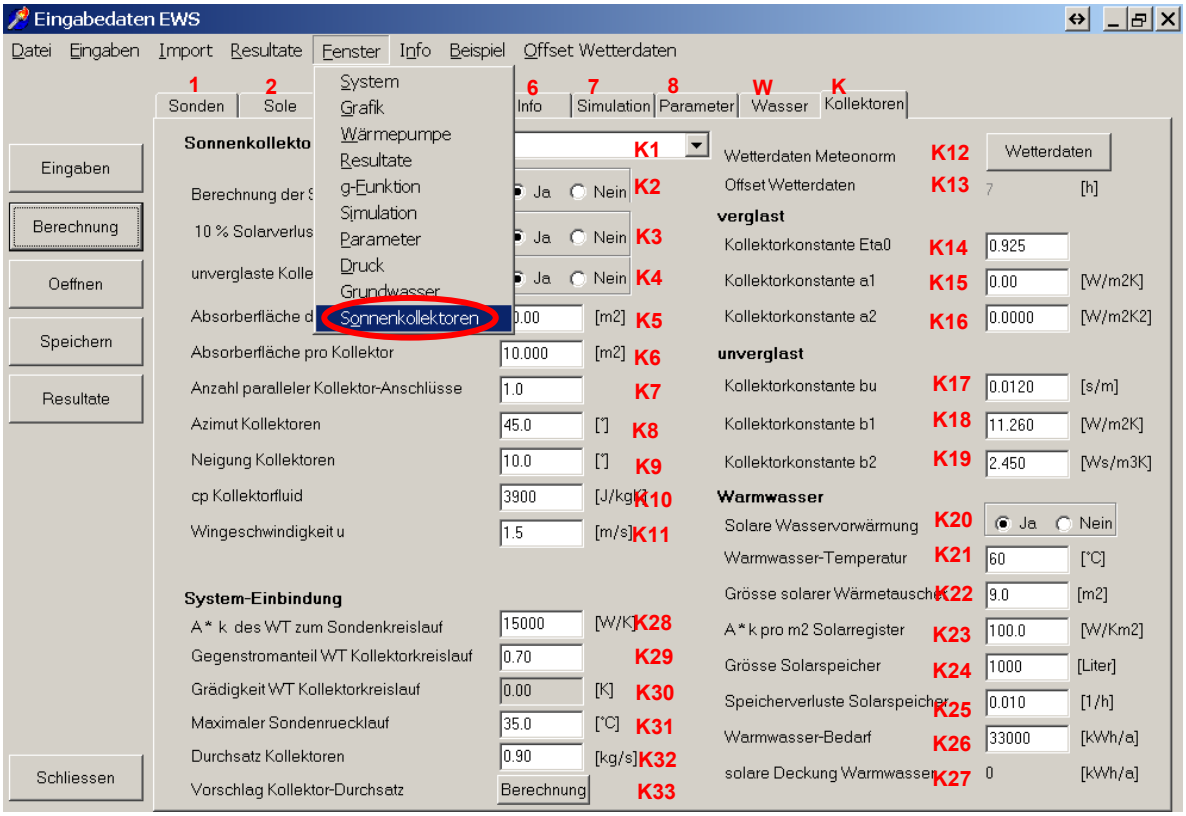


Abb. 3.44: Blatt „Sonnenkollektoren“ zur Berechnung der solaren Sondenregeneration

K1 Pulldown-Menü zur Auswahl einer beschränkten Anzahl von Sonnenkollektor-Typen. Keine zwingende Eingabe, da immer mit den Kollektor-Kennwerten gerechnet wird.

K2 Zur solaren Sondenregeneration muss K2 angewählt werden.

K3 Wird K3 angewählt, reduziert sich der Solarertrag um 10% zur Berücksichtigung der thermischen Verluste in den Solarleitungen und eine reale Regelung.

K4 Wird K4 auf „Ja“ gesetzt (= unverglaste Kollektoren), sind die Kollektorkonstanten K14-K16 auszufüllen, bei verglasten Kollektoren die Kollektorkonstanten K17-K19

K5 In K5 ist die Absorberfläche, und nicht die Brutto-Kollektorfläche einzugeben.

K11 Die Windgeschwindigkeit wird nur bei unverglasten Kollektoren berücksichtigt. Die Windgeschwindigkeit wird nicht aus den Wetterdaten gelesen, sondern das ganze Jahr konstant auf den Wert K11 gesetzt.

K13 Für den Solarertrag ist es wesentlich, ob die Wärmepumpe primär am Tag oder in der Nacht läuft. Im Standard-Lastprofil (Offset = 0h) läuft die Wärmepumpe für die Brauchwasser-Erwärmung bis Mitternacht und ab Mitternacht läuft die Wärmepumpe solange, bis der Wärmebedarf des ganzen Tages gedeckt ist. Die Laufzeit der Wärmepumpe kann mit dem Offset nun in den Tag verlegte werden. Bei einem Offset von 10 h wird das Brauchwasser bis 9.00 Uhr erzeugt und der Heizbetrieb der Wärmepumpe startet um 9.00 Uhr. Der Offset kann im Hauptmenü unter „Menü Wetterdaten“ gesetzt werden.

K20-K27 Die Berechnung des Direktnutzungsanteils für die solare Brauchwasservorwärmung stellt lediglich eine grobe Abschätzung dar. Der Wärmebedarf für das Brauchwarmwasser, das mit der Wärmepumpe erzeugt werden muss (Feld 10.3 auf dem Blatt „Lastprofil“) muss um den Betrag des Feldes K27 reduziert werden.

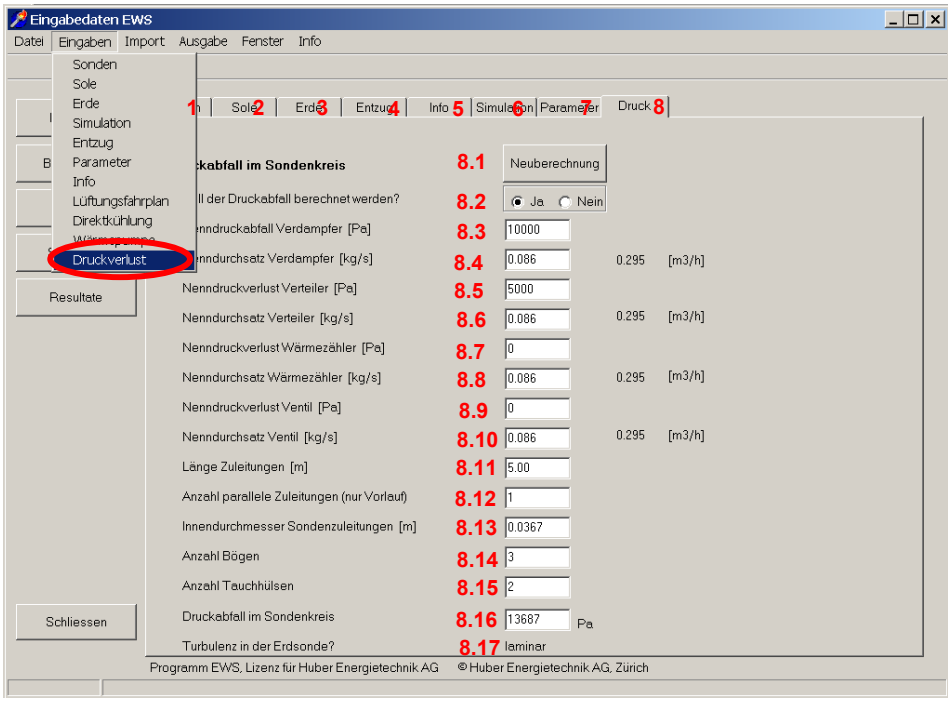
3.12 Blatt "Druck"

Um das Blatt „Druck“ einzublenden, wird in der Menü-Zeile unter der Rubrik „Fenster“ das Blatt „Druck“ oder in der Menü-Zeile unter der Rubrik „Eingaben“ die Auswahl „Druckverlust“ angewählt (cf. Abb. 3.46). Diese Option ist nur in der Vollversion des Programms zugänglich.

Abb. 3.45: Fehlermeldung, falls keine Vollversion des Programms Lizenziert ist.

Auf dem Blatt „Druck“ kann der Druckverlust im Sondenkreislauf berechnet werden und es wird berechnet, ob in der Sonde laminare oder turbulente Strömung herrscht. Eine ausführliche Beschreibung der Rechenmodelle ist in [11] zu finden.

Abb. 3.46: Blatt „Druck“.



8.1 Nach jeder Änderung von Eingaben ist der Button „Neuberechnung“ zu drücken, damit die Resultate angepasst werden.

8.2 Wird 8.2 auf „Ja“ gesetzt, so wird der Druckabfall in der Sonde (ohne Zuleitung) in jedem Stundenschritt neu berechnet und ins Resultatfile geschrieben. Der Wert für den Druckabfall im Resultatfile (Stundenschritte) beinhaltet also nur die Sonde, ohne Zuleitung / Verdampfer etc.

8.3-8.10 Angabe von Nenn-Druckabfällen von Einzelkomponenten bei Nenndurchsätzen. Der Nenndurchsatz kann für jede Komponente anders sein. Die Umrechnung auf den effektiven Druckabfall dieser Komponenten erfolgt über den Parabelansatz.

8.11 Länge der Sondenzuleitung (in der Regel vom Sondenkopf bis zum Sondenverteiler), für die der Druckabfall berechnet werden soll. Das Programm EWS berechnet den Gesamt-Druckabfall aus dem Druckabfall der Erdsonde plus der Summe der Einzelkomponenten im Sondenkreislauf plus 2 mal der Druckabfall der Sondenzuleitung (Sonden Vor- und Rücklauf).

8.12 Anzahl paralleler Sondenzuleitungen für die Druckabfallberechnung der Sondenzuleitung (vom Sondenkopf bis zum Verteiler). Werden z.B. bei einer Doppel-U-Sonde die beiden Sondenrohre einzeln auf den Verteiler geführt, so ist hier 2 einzugeben, werden die beiden Sondenrohre aber am Sondenkopf zusammengefasst, so ist 1 einzugeben. Gleich verhält es sich bei 2 Erdwärmesonden, die auf einen gemeinsamen Verteiler im Haus geführt werden. Werden bei 2 Doppel-U-Sonden die Sondenrohre einzeln auf die Verteiler geführt, so ist 4 einzugeben, werden die Sondenrohre je am Sondenkopf zusammengeführt, so ist 2 einzugeben, befindet sich der Sondenverteiler dicht bei den 2 Erdsonden und wird die Zuleitung vom Verteiler über eine grössere Strecke ins Haus geführt, so ist in diesem Fall 1 einzugeben.

8.13 Innendurchmesser der einzelnen Sondenzuleitung (in der Regel vom Sondenkopf bis zum Sondenverteiler). Bei einer Zuleitung DN 40 ist dies in der Regel 0.032 m, bei DN 50 ist es ca. 0.037 m.

8.14-8.15 Anzahl Tauchhülsen und Bögen im Sondenkreislauf (Total über ganzen Kreislauf angeben, Bögen in Sondenvor- und Rücklauf zusammenzählen). Der Druckabfall wird mit

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho_{Sole}}{2} v^2 \qquad \text{Gl. 3.4}$$

berechnet, wobei pro Bogen $\zeta = 2$ und pro Tauchhülsen $\zeta = 1$ eingesetzt wird.

8.16 Druckabfall für ganzen Sondenkreislauf. Unbedingt beachten: Nach jeder Änderung von Eingaben ist der Button „Neuberechnung“ zu drücken, damit die Resultate angepasst werden.

Der Druckverlust Δp der Rohrströmung in der Erdwärmesonde und der Zuleitung berechnet sich wie folgt:

$$\Delta p = \xi \frac{2H}{D_i} \frac{\rho_{Sole}}{2} v^2 \qquad \text{Gl. 3.5}$$

Im laminaren Bereich (Re < 2’300) gilt:

$$\xi = \frac{64}{\mathrm{Re}} \qquad \text{Gl. 3.6}$$

Im turbulenten Bereich (Re > 2'300) wird der Ansatz von Petukhov verwendet:

$$\xi = \left[0.790 \ln(\mathrm{Re}) - 1.64\right]^{-2} \qquad \text{Gl. 3.7}$$

Die restlichen Druckverluste werden nach dem Parabelansatz vom Nenndurchsatz auf den effektiven Sondendurchsatz umgerechnet.

8.17 Angabe über Strömungsverhältnisse in der Erdsonde (laminar oder turbulent). Der Umschlagpunkt erfolgt bei Re = 2'300.

3.13 Blatt "Parameter"

Um das Blatt „Parameter“ einzublenden, wird in der Menü-Zeile unter der Rubrik „Fenster“ das Blatt „Parameter“ angewählt (cf. Abb. 3.47). Auf dem Blatt „Parameter“ können das Simulations-Rechengitter und die Simulations-Zeitschritte sowie das Abbruchkriterium für die Iteration definiert werden. Zudem kann bestimmt werden, ob und wie die Resultate auf ein Ausgabefile geschrieben werden sollen.

Üblicherweise muss der Benutzer dieses Blatt nicht ausfüllen, sondern es kann mit den Default-Werten gerechnet werden.

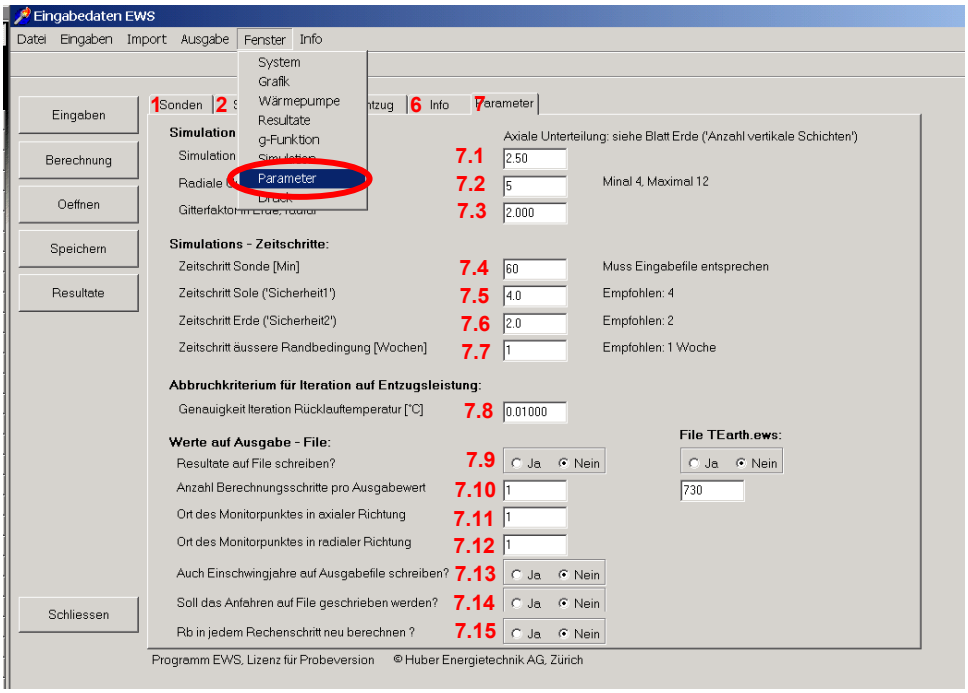

Eingabedaten EWS
Datei Eingaben Import Ausgabe Fenster Info
System
Grafik
Wärmepumpe
Resultate
g-Funktion
Parameter
Eingaben
Berechnung
Oeffnen
Speichern
Resultate
Schliessen
1 Sonden
6 Info
7 Parameter
Simulation
Axiale Unterteilung: siehe Blatt Erde ('Anzahl vertikale Schichten')
7.1 2.50
7.2 5
Minal 4, Maximal 12
7.3 2.000
Simulations - Zeitschritte:
Zeitschritt Sonde [Min] 7.4 60 Muss Eingabefile entsprechen
Zeitschritt Sole ('Sicherheit1') 7.5 4.0 Empfohlen: 4
Zeitschritt Erde ('Sicherheit2') 7.6 2.0 Empfohlen: 2
Zeitschritt äussere Randbedingung [Wochen] 7.7 1 Empfohlen: 1 Woche
Abbruchkriterium für Iteration auf Entzugsleistung:
Genauigkeit Iteration Rücklauftemperatur [°C] 7.8 0.01000
Werte auf Ausgabe - File:
File TEarth.ews:
Resultate auf File schreiben? 7.9 Ja Nein Ja Nein
Anzahl Berechnungsschritte pro Ausgabewert 7.10 1 730
Ort des Monitorpunktes in axialer Richtung 7.11 1
Ort des Monitorpunktes in radialer Richtung 7.12 1
Auch Einschwingjahre auf Ausgabefile schreiben? 7.13 Ja Nein
Soll das Anfahren auf File geschrieben werden? 7.14 Ja Nein
Rb in jedem Rechenschritt neu berechnen ? 7.15 Ja Nein
Programm EWS, Lizenz für Probeversion © Huber Energietechnik AG, Zürich

Abb. 3.47: Blatt „Parameter“.

Im Feld 7.15 wird definiert, ob der thermische Bohrlochwiderstand R_b in jedem Rechenschritt neu berechnet werden soll. Der Bohrlochwiderstand R_b (thermischer Widerstand zwischen Bohrloch und Sondenfluid) ist im wesentlichen eine Grösse, die die geometrischen Faktoren der Sondenrohre im Bohrloch und die Stoffwerte der Hinterfüllung und der Sondenrohre enthält. Zusätzlich ist darin aber auch der betriebsabhängige Wärmeübergangskoeffizient α vom Sondenrohr ins Fluid enthalten. Diese Grösse hängt vom aktuellen Sondendurchsatz ab. Da das Programm EWS die Möglichkeit bietet, mit variablem Sondendurchsatz zu simulieren, kann der Benutzer im Feld 7.15 wählen, ob der Wärmeübergang α und damit der Bohrlochwiderstandes R_b in jedem Rechenschritt neue berechnet wird, oder ob R_b für die ganze Simulation konstant gehalten wird. Wird das Feld 7.15 auf der Default-Einstellung („nein“) belassen, wird der R_b-Wert am Anfange der Simulation anhand des Auslegungsmassenstrom (Feld 2.7) berechnet und bleibt während der Simulation konstant. Die Wahl hat einen Einfluss auf die Rechengeschwindigkeit.

3.14 Wärmepumpenkenngrössen und Zusatzheizung

In der Vollversion des Programms EWS können zusätzliche Angaben über die Wärmepumpe sowie über Zusatzheizsysteme berücksichtigt werden. Unter der Rubrik „Fenster“ wird das Blatt „Wärmepumpe“ angewählt (cf. Abb. 3.48). Daraufhin wird das Blatt „Wärmepumpe“ eingeblendet. Das Blatt „Wärmepumpe“ kann nicht mit dem Blatt „Lastprofil“ kombiniert werden.

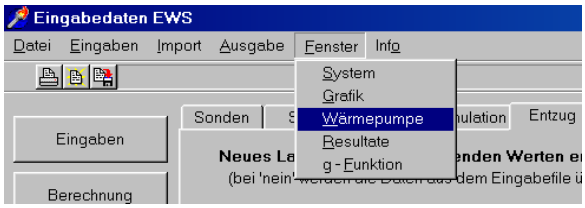


Abb. 3.48: Aufrufen der Eingabemaske für Angaben über die Wärmepumpe

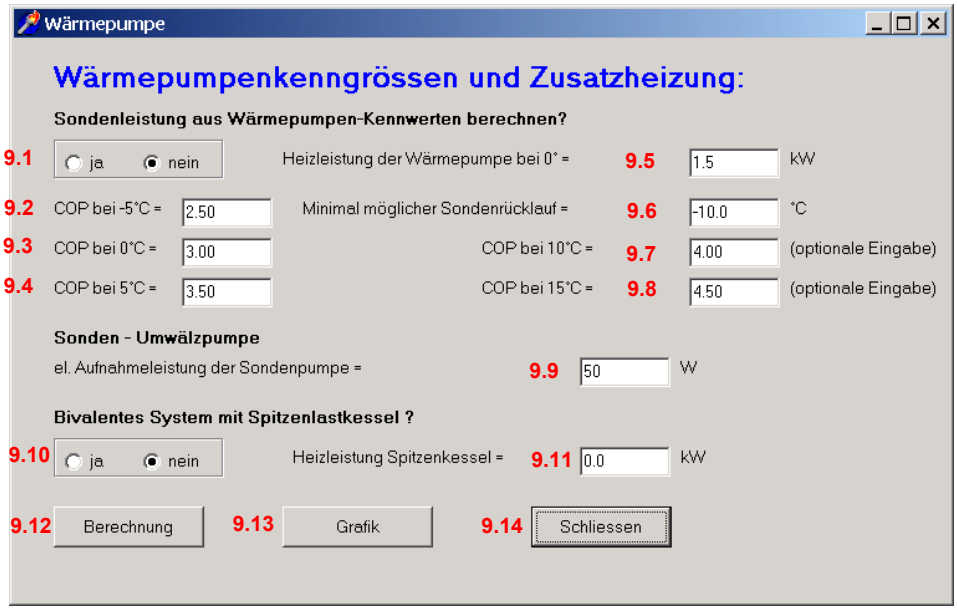

Wärmepumpe
Wärmepumpenkenngrössen und Zusatzheizung:
Sondenleistung aus Wärmepumpen-Kennwerten berechnen?
9.1 ja nein
Heizleistung der Wärmepumpe bei 0° = 9.5 1.5 kW
9.2 COP bei -5°C = 2.50
Minimal möglicher Sondenrücklauf = 9.6 -10.0 °C
9.3 COP bei 0°C = 3.00
COP bei 10°C = 9.7 4.00 (optionale Eingabe)
9.4 COP bei 5°C = 3.50
COP bei 15°C = 9.8 4.50 (optionale Eingabe)
Sonden - Umwälzpumpe
el. Aufnahmeleistung der Sondenpumpe = 9.9 50 W
Bivalentes System mit Spitzenlastkessel ?
9.10 ja nein
Heizleistung Spitzenkessel = 9.11 0.0 kW
9.12 Berechnung
9.13 Grafik
9.14 Schliessen

Abb. 3.49: Eingabemaske "Wärmepumpenkenngrössen und Zusatzheizung".

9.1 Wird die Frage "Sondenleistung aus Wärmepumpen-Kennwerten berechnen" mit "ja" beantwortet, werden für die EWS-Berechnung die Angaben aus dieser Eingabemaske verwendet. Das Programm überprüft nun in einem ersten Schritt, ob die Heizleistung der Wärmepumpe in Feld 9.5 mit dem COP bei 0°C Quellentemperatur in Feld 9.3 und der Verdampferleistung (=Entzugsleistung Sonde) in Feld 4.4 übereinstimmen. Ist dies nicht der Fall, so fragt das Programm nach, ob Feld 4.4 angepasst werden soll. Wird das Feld 4.4 nun nicht angepasst, so wird das Feld 9.5 für die weitere Berechnung ignoriert.

Wird Feld 9.1 auf „ja“ gesetzt, so werden ausserdem die Entzugsleistungen QSource (Feld 4.4) als Verdampferleistung bei 0°C Quellentemperatur interpretiert. In jedem Rechenschritt wird die effektive Verdampferleistung dem effektiven COP angepasst, wobei das Programm EWS eine konstante Heizleistung (entsprechend der Eingabe in Feld 9.5) annimmt.

9.2-9.4, 9.7-9.8 Hier werden die COP's bei verschiedenen Sole-Temperaturen angegeben. Zu beachten ist, dass die Eingaben in Feld 9.7 und 9.8 optional sind. Ist der Wert nicht bekannt, so können diese Felder Null gesetzt werden und das Programm extrapoliert linear.

9.9 Hier ist die elektrische Aufnahmeleistung der Sondenumwälzpumpe einzugeben.

9.10/9.11 Bei bivalenten Systemen mit einem Spitzenlastkessel kann hier die Heizleistung des Spitzenlastkessels eingegeben werden (Anwendung nur bei Systemsimulation).

3.15 Direktkühlung

In der Vollversion des Programms EWS besteht die Möglichkeit, Angaben über eine Direktkühlung einzubringen. Unter der Rubrik „Fenster“ wird das Blatt „System“ angewählt (cf. Abb. 3.50). Daraufhin wird das Blatt „Systemdefinition“ eingeblendet (cf. Abb. 3.51).

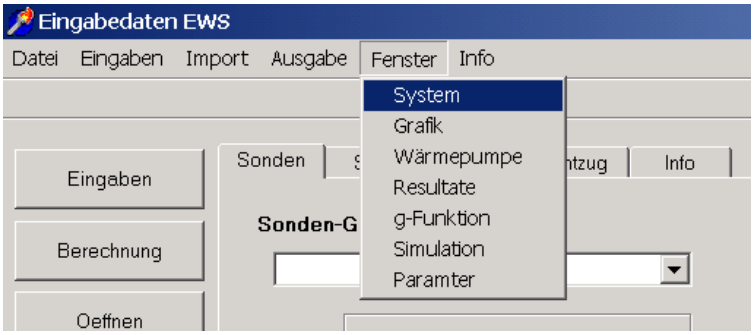


Abb. 3.50: Aufrufen der Eingabemaske für eine Direktkühlung.

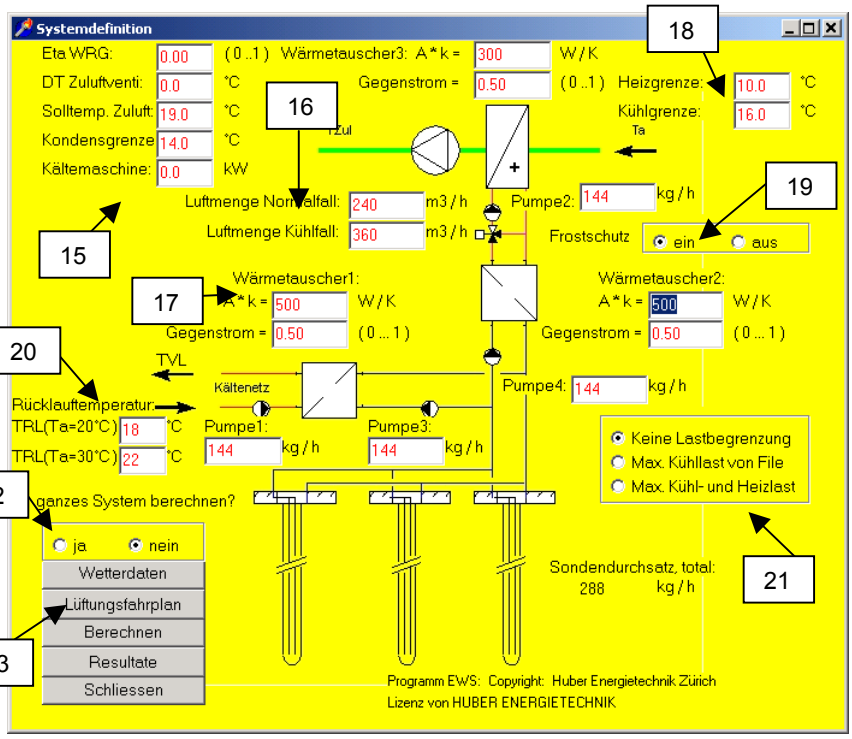


Abb. 3.51: Eingabemaske "Systemdefinition" für Direktkühlung.

15. Der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung WRG, die Temperaturen des Ventilators und der Zuluft, die Kondensationsgrenze und die Leistung der Kältemaschine werden hier eingefügt.
16. Die Luftmenge im Normalfall sowie im Kühlfall werden hier eingegeben.
17. Hier werden die Kennwerte der verschiedenen Wärmetauscher im System (3 Stück) angegeben. Zudem stehen 4 Pumpen zur Verfügung, deren Massenströme eingefügt werden können.
18. Die Heiz- und die Kühlgrenze werden eingefügt.

19. Es kann gewählt werden, ob das System über einen Frostschutz verfügt oder nicht.

20. Die Rücklauftemperaturen aus dem Kältenetz werden für Aussentemperaturen von 20 °C und 30 °C angegeben.

21. Hier kann angegeben werden, ob die Direktkühlung ohne Lastbegrenzung, ob nur die maximale Kühllast oder ob die maximalen Kühl- und Heizlasten basierend auf den Angaben auf Blatt "Entzug" berechnet werden soll. Bei Variantenberechnungen sollte diese Auswahl immer überprüft werden.

22. Wird bei Punkt 22 "Ja" ausgewählt, beruhen die Berechnungen auf den Angaben auf dieser Eingabemaske. Bei "Nein" basieren die Berechnungen auf den Angaben des Blattes "Entzug".

23. Es kann ein Lüftungsfahrplan definiert werden.

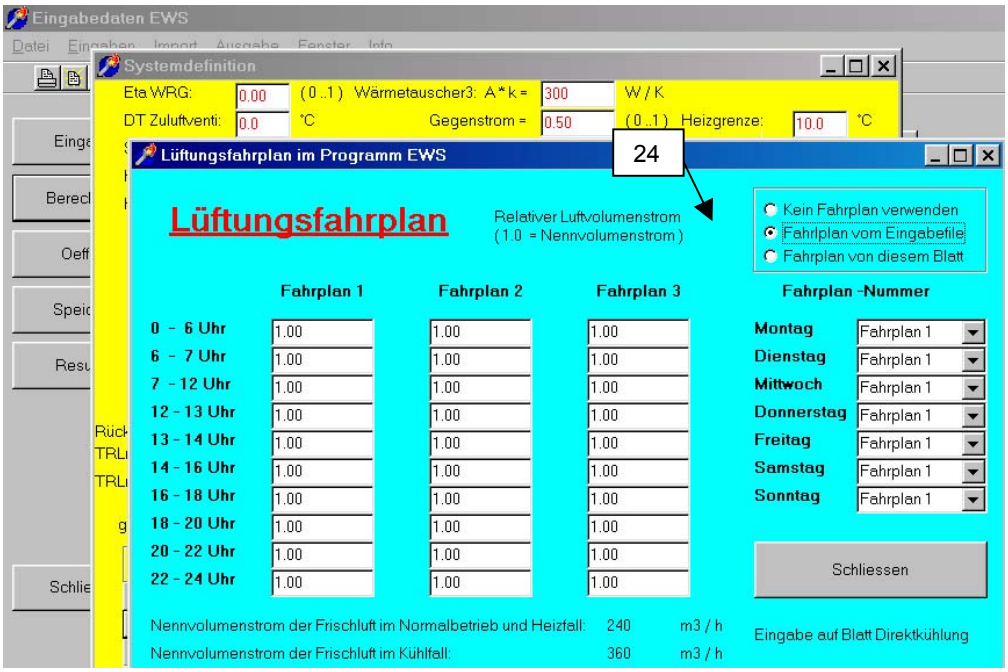


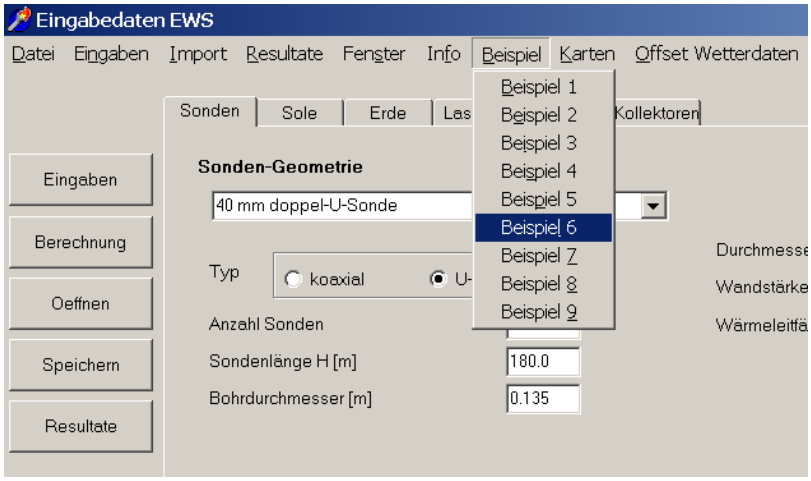
Abb. 3.52: Eingabemaske "Lüftungsfahrplan".

24. Das Programm generiert einen Fahrplan, wenn nichts anderes eingegeben wurde. Es kann jedoch auch auf einen Fahrplan verzichtet werden oder der Fahrplan kann selbst definiert werden.

4 Beispielsammlung

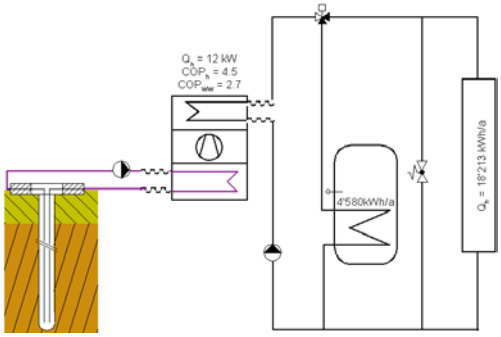
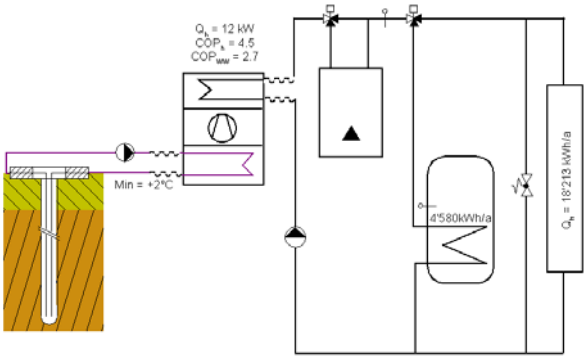
4.1 Aufruf und Laden der Beispiele

In der Pro-Version des Programms EWS ist eine Sammlung mit 9 typischen Rechenbeispielen enthalten, die direkt ins Programm eingelesen und berechnet werden können. Die Beispiele können als Grundlage für eigene Berechnungen dienen. Die Beispiele sind im Kapitel 4.2 einzeln beschrieben. Der Aufruf der Beispiele erfolgt über das Menü „Beispiel“:



4.2 Im Programm enthaltene Rechenbeispiele:

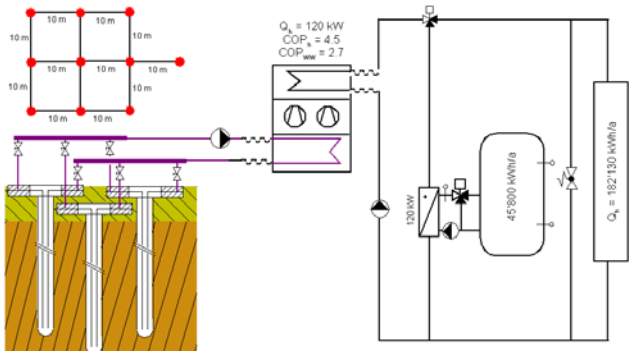
Im Programm EWS (Pro-Version) sind die folgenden Rechenbeispiele enthalten:

Beispiel 1:	EFH mit monovalenter Heizungswärmepumpe
• Anzahl Erdwärmesonden: 1 • Sondenlänge: 185 m • Sondenart: 40 mm duplex • Heizleistung Wärmepumpe: 12 kW • Heizwärmebedarf: 18'213 kWh • COP Heizung: 4.5 • Wärmebedarf Warmwasser: 4’580 kWh • COP Warmwasser: 2.7	
Beispiel 2:	**Bivalente Wärmepumpenanlage mit 1 Erdsonde**
• Anzahl Erdwärmesonden: 1 • Sondenlänge: 210 m • Sondenart: 40 mm duplex • Heizleistung Wärmepumpe: 12 kW • Heizwärmebedarf: 18'213 kWh • COP Heizung: 4.5 • Wärmebedarf Warmwasser: 4’580 kWh • COP Warmwasser: 2.7 • Minimaler Sondenrücklauf: 2°C • Zusatzheizung: Gasheizung	

Beispiel 3:

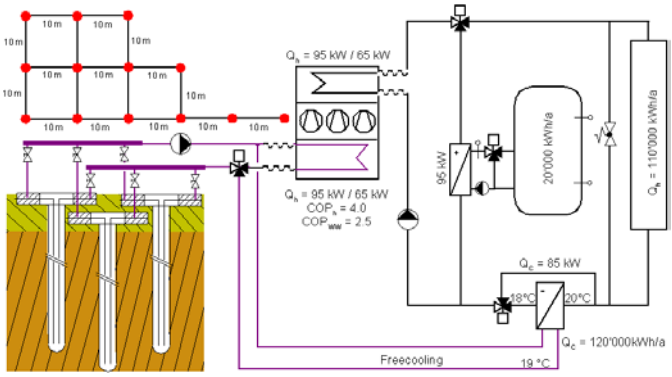
- Anzahl Erdwärmesonden: 10
- Sondenlänge: 210 m
- Sondenart: 40 mm duplex
- Heizleistung Wärmepumpe: 120 kW
- Heizwärmebedarf: 182'130 kWh
- COP Heizung: 4.5
- Wärmebedarf Warmwasser: 45'800 kWh
- COP Warmwasser: 2.7

Sondenfeld für MFH mit 10 Erdwärmesonden



Beispiel 4:

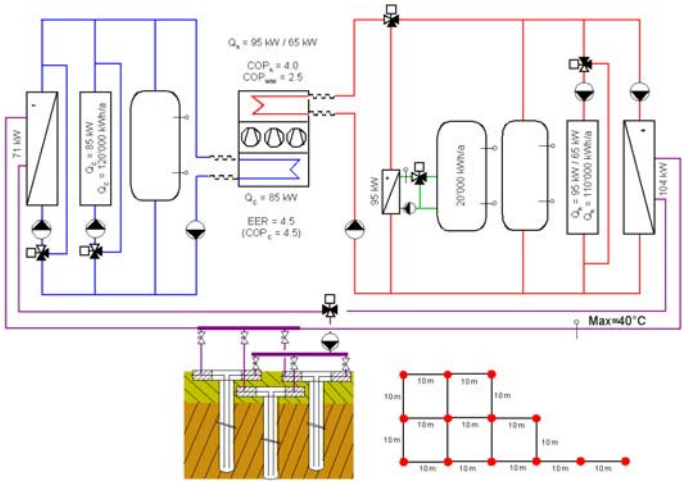
- Anzahl Erdwärmesonden: 13
- Sondenlänge: 140 m
- Sondenart: 40 mm duplex
- Heizleistung Wärmepumpe: 95 kW
- Heizwärmebedarf: 110'000 kWh
- COP Heizung: 4.0
- Wärmebedarf Warmwasser: 20'000 kWh
- COP Warmwasser: 2.5
- Kühlenergiebedarf 120'000 kWh
- max. Freecooling - Rücklauf: 19 °C



Beispiel 5

- Anzahl Erdwärmesonden: 13
- Sondenlänge: 140 m
- Sondenart: 40 mm duplex
- Heizleistung Wärmepumpe: 95 kW
- Heizwärmebedarf: 110'000 kWh
- COP Heizung: 4.0
- Wärmebedarf Warmwasser: 20'000 kWh
- COP Warmwasser: 2.5
- Kühlleistung Kältemaschine: 85 kW
- Kühlenergiebedarf 120'000 kWh
- EER (=COPc)Kühlung: 4.5
- max. Sonden - Rücklauf: 40 °C

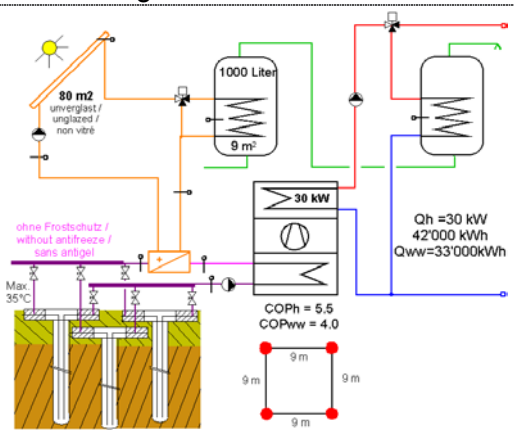
Monovalente Heizung mit aktiver Kühlung



Beispiel 6:

- Anzahl Erdwärmesonden: 4
- Sondenlänge: 180 m
- Sondenart: 40 mm duplex
- Heizleistung Wärmepumpe: 30 kW
- Heizwärmebedarf: 42'000 kWh
- COP Heizung: 5.5
- Wärmebedarf Warmwasser: 33'000 kWh
- COP Warmwasser: 4.0
- max. Sonden - Rücklauf: 35 °C
- Fläche unverglaste Kollektoren: 80 m^2
- Wetterdaten: Zürich SMA
- Offset Wetterdaten: 7 h

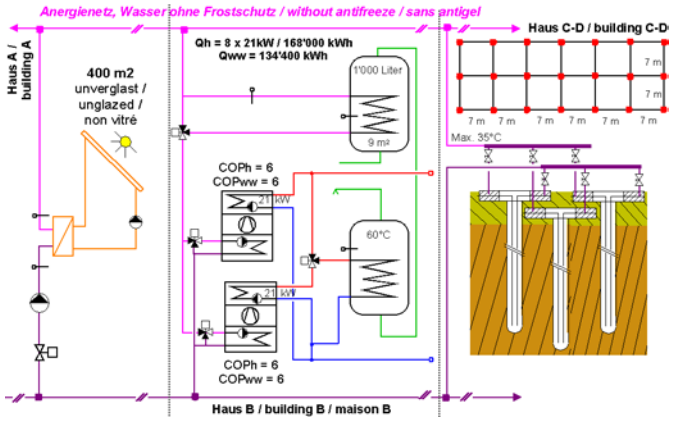
Solare Sondenregeneration



Beispiel 7:

- Anzahl Erdwärmesonden: 21
- Sondenlänge: 180 m
- Sondenart: 40 mm duplex
- Heizleistung pro Wärmepumpe: 21 kW
- Anzahl Wärmepumpen total:
- Heizwärmebedarf alle Häuser: 168’000 kWh
- COP Heizung: 6.0
- Wärmebedarf Warmwasser: 134’400 kWh
- COP Warmwasser: 6.0
- max. Sonden - Rücklauf: 35 °C
- Fläche unverglaste Kollektoren: 400 m^2
- Wetterdaten: Zürich SMA
- Offset Wetterdaten: 7 h

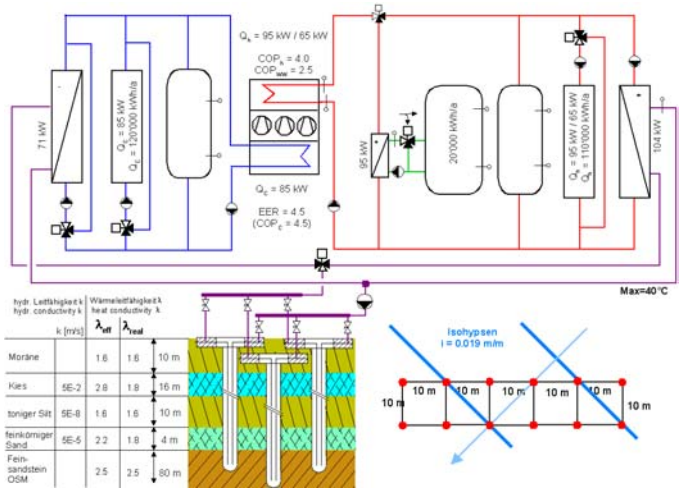
Anergienetz mit solarer Saisonspeicherung


Anergienetz, Wasser ohne Frostschutz / without antifreeze / sans antigel
Haus A / building A
400 m2 unverglast / unglazed / non vitré
Qh = 8 x 21kW / 168'000 kWh
Qww = 134'400 kWh
1'000 Liter
9 m3
COPh = 6
COPww = 6
21 kW
60°C
Haus C-D / building C-D
7 m
Max. 35°C
Haus B / building B / maison B

Beispiel 8:

- Anzahl Erdwärmesonden: 12
- Sondenlänge: 120 m
- Sondenart: 40 mm duplex
- Heizleistung Wärmepumpe: 95 kW
- Heizwärmebedarf: 110’000 kWh
- COP Heizung: 4.0
- Wärmebedarf Warmwasser: 20’000 kWh
- COP Warmwasser: 2.5
- Kühlleistung Kältemaschine: 85 kW
- Kühlenergiebedarf 120'000 kWh
- EER (=COPc)Kühlung:4.5
- Mächtigkeit Grundwasser (GW): 8 m
- Material der GW-Schicht: Kies
- hydr. Leitfähigkeit GW-Schicht: 0.05 m/s
- Druckgradient des GW: 0.019 m/m
- eff. Wärmeleitfähigeit des Kies (mit GW-Einfluss, aus TRT): 2.8 W/mK
- Wärmeleitfähigkeit Kies (ohne GW): 1.8 W/mK

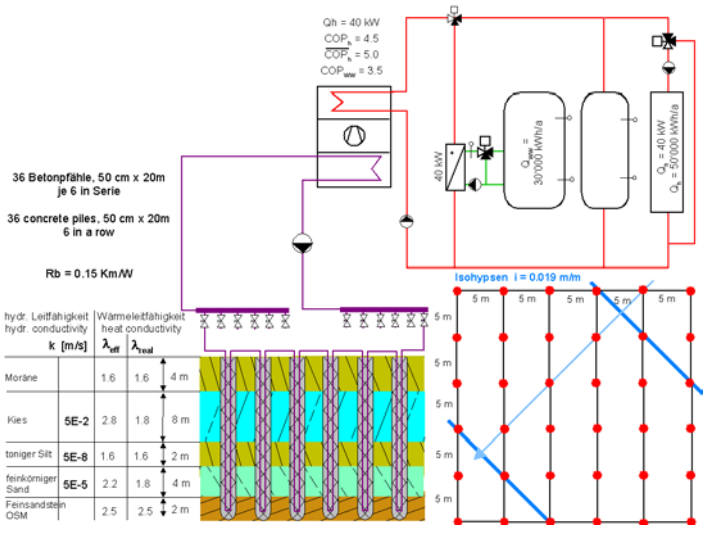
Heizung und aktive Kühlung mit Grundwassereinfluss



Beispiel 9:

- Anzahl Energiepfähle: 36Stk.
- Anzahl Pfähle in Serie: 6 Stk.
- Länge Energiepfähle 20 m
- Pfahlart: Beton, 50cm
- „Bohrlochwiderstand“ Rb: 0.15 Km/W
- Heizleistung Wärmepumpe: 40 kW
- Heizwärmebedarf: 50’000 kWh
- COP Heizung Auslegungsfall: 4.5
- COP Heizung Durchschnitt: 5.0
- Wärmebedarf Warmwasser: 30’000 kWh
- COP Warmwasser: 3.5
- Mächtigkeit Grundwasser (GW): 8 m
- Material der GW-Schicht: Kies
- hydr. Leitfähigkeit GW-Schicht: 0.05 m/s
- Druckgradient des GW: 0.019 m/m
- eff. Wärmeleitfähigeit Kies (mit GW): 2.8 W/mK
- Wärmeleitfähigkeit Kies (ohne GW): 1.8 W/mK

36 Energiepfähle (Betonpfähle) im Grundwasser



5 Berechnung

5.1 Graphische Darstellung von Quellen- und Rücklauftemperatur

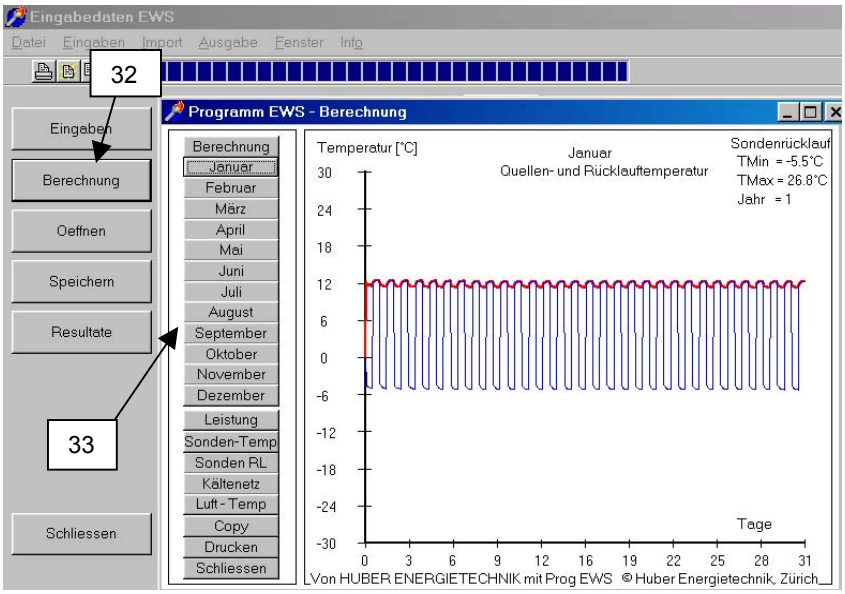


Abb. 5.1: Graphische Darstellung der Quellen- und Rücklauftemperatur im Monat Januar.

32. Sind alle Felder vollständig ausgefüllt, wird durch Anklicken auf den Button "Berechnung" die Simulationsrechnung ausgeführt und graphisch dargestellt.

    Die beiden Graphen geben die Quellen- und Rücklauftemperaturen in den entsprechenden Monaten an. Die Angaben zur Minimal- und Maximaltemperatur TMin und TMax geben die beiden Extremwerte während des gesamten Simulationszeitraums an.

33. Die Berechnungen der einzelnen Monate können durch Anklicken des gewünschten Monats betrachtet, ausgedruckt oder kopiert (beispielsweise in ein Word-File) werden.

5.2 Graphische Darstellung der Entzugsleistung

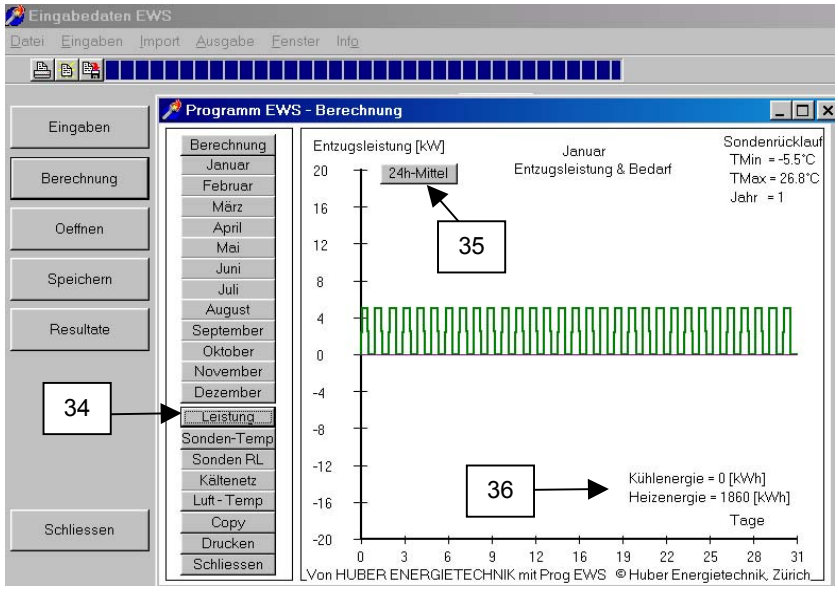


Abb. 5.2: Graphische Darstellung der Entzugsleistung.

34. Durch Anklicken des Buttons "Leistung" wird die Leistung der Erdwärmesonde in den Monaten angezeigt. Ist diese Leistung positiv, wird der Sonde Wärme entzogen, im negativen Fall wird der Sonde Wärme zugeführt.
35. Durch Anklicken des Buttons "24h-Mittel" wird die gemittelte Leistung über einen Tag angegeben.
36. In der Ansicht "Leistung" werden die Kühl- und Heizenergien des gewählten Monats gezeigt.

    Sämtliche Graphiken aller Monate können ausgedruckt oder beispielsweise in ein Wordfile kopiert werden. Die eingegebenen Werte können gespeichert und durch Anklicken des Buttons "Projekt laden" auf der Startseite wieder aufgerufen werden.

5.3 Temperaturverlauf über ganze Simulationsperiode

Anstelle von Monats-Darstellungen kann auch das ganze, letzte Simulationsjahr und der Temperaturverlauf über die ganze Simulationsperiode dargestellt werden. Nach der Simulation wählt man dazu im Menü „Resultate“ die Auswahl „Grafik ganze Simulation“ an (oder man doppelklickt einfach auf eine Monatsgrafik):

Darauf erscheint der Verlauf über die ganze Simulationsperiode. Dargestellt wird, je nach Auswahl, die monatliche Maximaltemperatur (rot), Minimaltemperatur (blau) oder Durchschnittstemperatur (grün) der Sonden-Rücklauftemperatur (TSink = Sonden-Eintrittstemperatur), sowie die Soletemperatur TBrine (pink, Durchschnittstemperatur von Quellentemperatur und Sondenrücklauftemperatur TBrine = (TSink + TSource)/2):

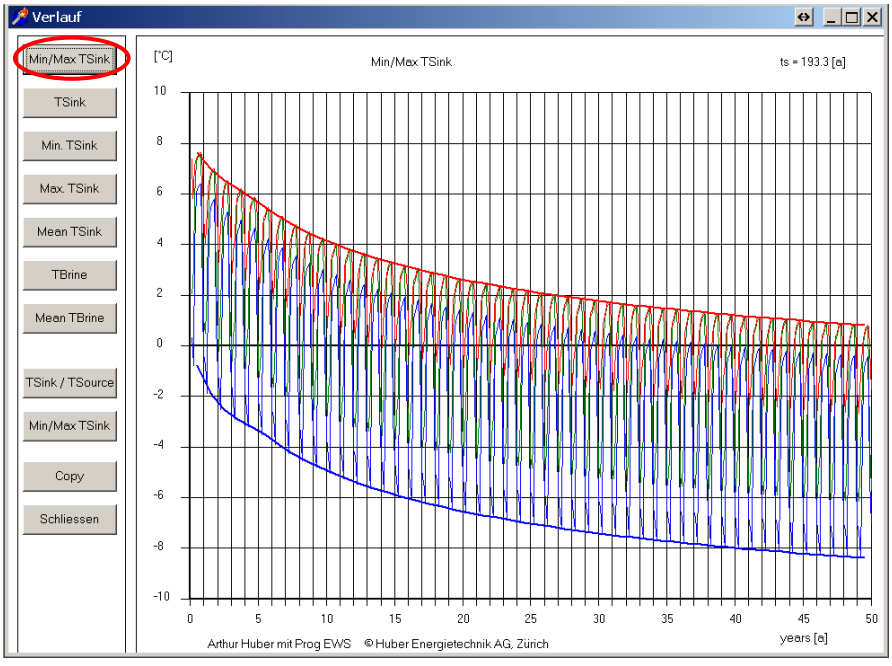


Abb. 5.3: Grafische Darstellung der Sole-Temperaturen über die ganze Simulationszeit. Dargestellt in diesem Beispiel ist das Monats-Maximum (rot) und Monats-Minimum (blau) der Sonden-Eintrittstemperatur.

5.4 Darstellung ganzer Jahresverlauf (letztes Simulationsjahr)

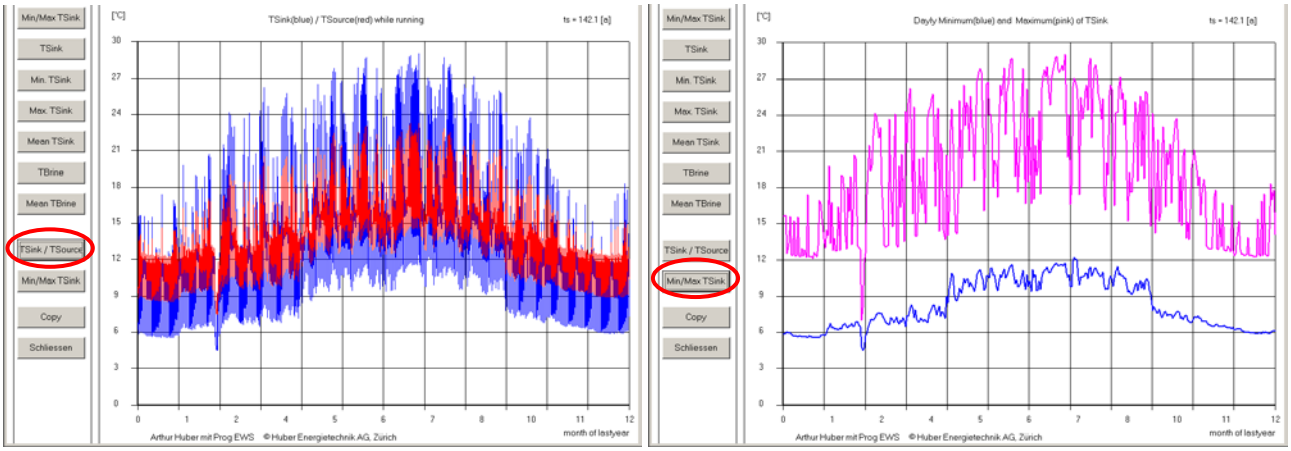


Abb. 5.4: Grafische Darstellung der Sole-Temperaturen im ganzen, letzten Simulationsjahr. Links: Effektiver Verlauf der Sondentemperaturen (ohne Stillstandszeit); Rechts: Tagesextrema.

5.5 Resultatblatt

Nach der Berechnung kann anstelle der grafischen Darstellung auch eine Tabelle mit den Resultaten angezeigt werden. Im Menü „Fenster“ wird „Resultate“ angewählt. Darin zu finden ist eine Übersicht über einzelne Rechenresultat, wie z.B. den Deckungsgrad beim Freecooling.

Fallbeschrieb:

Projekt Erdwaermesonden

Programm EWS, Ver 4.0 mit Default-Werten

Grafik | Eingaben ändern | Neuberechnung | Schliessen

Eingabedaten:			**Resultate:**		
Wärmeleitfähigkeit Erde =	2.4	W/mK	Wärmeeintrag in Erdwärmesonden =	0	kWh
Anzahl Erdwärmesonden =	1		Wärmeentzug aus Erdwärmesonden =	2416	kWh
Bohrtiefe der Erdwärmesonden =	20.0	m	Jahres-Kühlenergie des Kältenetzes (TABS) =		kWh
Sondenabstand =		m	Kühlbedarf des Gebäudes =		kWh
Sonden-Aussendurchmesser =	32	mm	Deckungsbeitrag Kühlung mit Erdsonden =		%
Entzugsleistung aus Erdwärmesonden =	1.0	kW	Minimale Sondenrücklauftemperatur =	-10.6	°C
Rückkühlleistung in Erdwärmesonden =	1.0	kW	Maximale Sondenrücklauftemperatur =	-0.8	°C
Dauerentzug Ende Februar =	4	Tage	Maximale Kühlleistung Sonden =	0.0	kW
Entzugsleistung im Dauerbetrieb =	1.0	kW	Maximale Heizleistung der Sonden =	1.0	kW
Max. benötigte Kühlleistung =	0.0	kW	mittlere Sondenbelastung Juli / August =	0.0	W/m
Max. benötigte Heizleistung =	0.0	kW	Anzahl Stunden über der Zuluft-Solltemperatur=	0	h
Zulufterwärmung im Ventilator =	0.0	°C	Kälte aus Kühlmaschine =	0	kWh
Wirkungsgrad der WRG der Zuluft =	0.00		Wärmeertrag der Wärmerückgewinnung WRG=	0	kWh
el. Leistung der Sondenpumpe =		W	Wärmebedarf total =	2416	kWh
Wärmeleistung der Zusatzheizung =		kW	Fehlende Wärme der Wärmepumpe =	0	kWh
COP der Wärmepumpe bei -5°C =			- davon gedeckt durch Zusatzheizung =		kWh
COP der Wärmepumpe bei 0°C =			Strombedarf der Wärmepumpe =	0	kWh
COP der Wärmepumpe bei 5°C =			Strombedarf der Sondenpumpe =		kWh
COP der Wärmepumpe bei 10°C =			Mittlerer COP der Wärmepumpe =	0.00	
COP der Wärmepumpe bei 15°C =			Jahresarbeitszahl JAZ der Wärmepumpe =	0.00	
Jahres - Laufzeit der WP =	2416	h	Druckabfall Sonde bei Auslegungsbedingung=	610	Pa

Abb. 5.5: Blatt „Resultate“.

Zu beachten sind die folgenden Punkte:

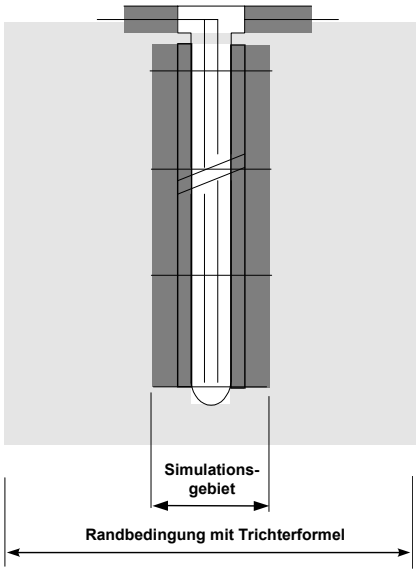
- Druckabfall wird beim Auslegungsmassenstrom, nur für die Sonde (ohne Zuleitungen und Verdampfer-Druckabfall) ausgegeben. Im Resultat-File können aber auch die Stundenwerte herausgelesen werden. Der Druckabfall des ganzen Sondenkreises und die Angabe über laminare oder turbulente Strömung in der Sonde können aus dem Blatt „Druck“ (Kapitel 3.10) herausgelesen werden.
- Wärmebedarf total: Wenn die Last mit dem Blatt „Entzug“ (Kapitel 3.7) definiert wurde, enthält dieses Feld die Summe des Wärmeentzugs der Sonde über das letzte Simulationsjahr, wurde die Last mit dem Blatt „Lastprofil“ (Kapitel 3.8) definiert, so enthält dieses Feld den Wärmebedarf des Gebäudes.

6 ANHANG A: Modellbeschrieb

Nachfolgend sind Auszüge aus den Modellen im Programm EWS wiedergegeben. Es sind allerdings nur jene Teile dargestellt, die für das Verständnis der Eingabeparameter massgebend sind. Die komplette Modell-Beschreibung ist in [5], [6] und [8] zu finden.

6.1 Simulationsbereich

Da bei Sonden von über 50m Länge die vertikale Wärmeleitung im Sondennahbereich (<3m Abstand von der Sonde) kaum ins Gewicht fällt, verzichten wir in diesem Bereich auf die Berechnung der vertikalen Wärmeleitung. Somit kann die Wärmeleitungsgleichung in Zylinderkoordinaten schichtweise eindimensional gelöst werden. Schichtweise sind so unterschiedliche Stoffwerte möglich, so dass auch die häufig vorkommenden, unterschiedlichen Gesteinsschichten im Erdreich mitberücksichtigt werden können.



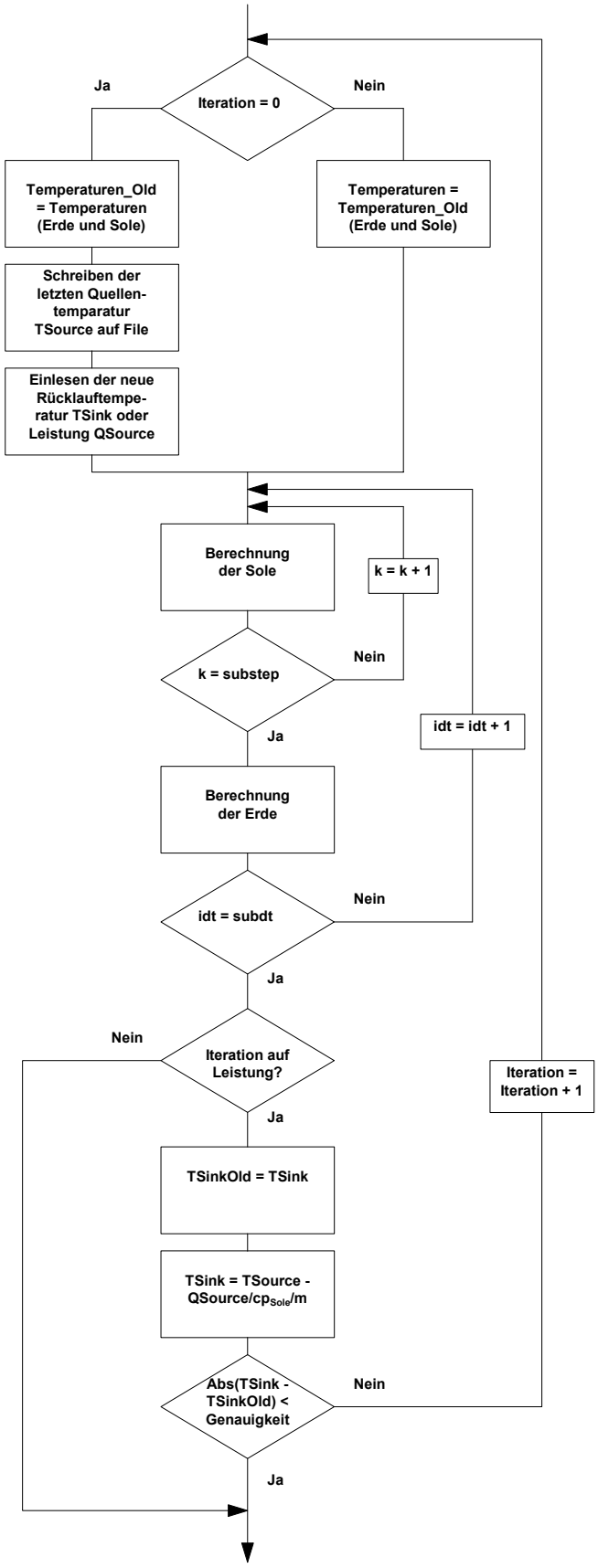
Für die Simulation der Erdreichtemperaturen im Sonden-Nahbereich (1.5 m - 3 m) soll das Crank-Nicholson-Verfahren angewendet werden.

Als innere Randbedingung soll die durchschnittliche Solentemperatur der jeweiligen Schicht genommen werden. Um dem gestellten Anforderungsprofil zu genügen, soll die Sole mit einem expliziten Zeitschrittverfahren dynamisch simuliert werden. Dadurch ist es möglich, auch das Anfahrverhalten der Sonde zu berechnen.

Die äusseren Temperatur-Randbedingungen werden mit den dimensionslosen Temperatur-Sprungantworten (g-functions, 6.3.3) berechnet. Dabei kann zwischen dem Ansatz von Carslaw & Jaeger [1] und von Eskilson [3] ausgewählt werden. Das Problem des nicht konstanten Wärmeentzugs und der Regeneration der Erde kann elegant durch Superposition von beliebig vielen, zu unterschiedlichen Zeitpunkten beginnenden, konstanten Wärmeentzügen gelöst werden.

Mit dem gewählten Ansatz können intern unterschiedliche Zeitschritte verwendet werden: Die kürzesten Zeitschritte werden bei der dynamischen Berechnung der Sole benötigt, für die Crank-Nicholson-Berechnung im Simulationsgebiet kommt ein grösserer Zeitschritt zur Anwendung. Für die Berechnung der Erde ausserhalb des Simulationsgebietes mit den g-functions reicht gar ein Zeitschritt von einer Woche. Diese unterschiedlichen Zeitschritte sind auch anschaulich einleuchtend: Temperaturstörungen kommen immer von innen (von der Sonde), womit innen auch die kleinsten Zeitschritte nötig sind. Weiter aussen machen sich nur der gemittelte Wärme-Entzug oder -Eintrag bemerkbar. Auf diese Weise gelingt es, ohne einen Verlust an Genauigkeit eine Erdsonde mit wesentlich geringerem Rechenaufwand zu simulieren als mit herkömmlichen Ansätzen.

6.1.1 Simulation des Zeitschrittes



Bei Erdwärmesonden gibt es prinzipiell zwei Betriebsarten:

1. Abkühlung der Quellentemperatur TSource mit einer vorgegebenen Entzugsleistung QSource [kW] in einer Wärmepumpe.
2. Erwärmung oder Abkühlung der Sonde in einem Prozess auf eine vorgegebene Temperatur TSink (z.B. Einsatz der Erdwärmesonde zur Kühlung eines Gebäudes).

Im Programm EWS sind beide Möglichkeiten vorgesehen. Setzt man den Eingabeparameter *Leistung = true (Feld 6.2 auf „ja“ setzen)*, so wird auf diese Entzugsleistung hin iteriert, bei *Leistung = false (Feld 6.2 auf „nein“ setzen)* erfolgt keine interne Iteration, sondern es wird bei einer vorgegebenen Rücklauftemperatur TSink die entsprechende Quellentemperatur TSource berechnet.

Die Eingabe der Rücklauftemperatur TSink ist in jedem Fall notwendig, bei *Leistung = true (Feld 6.2 auf „ja“ gesetzt)*, dient sie allerdings nur als 1. Schätzwert für die Iteration.

6.2 Rechengitter

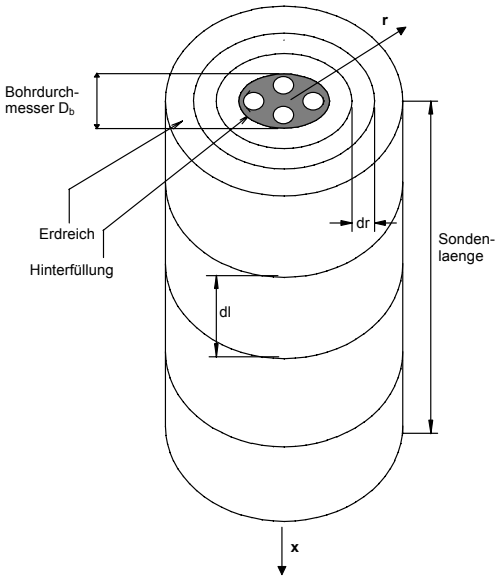


Abb. 6.1 Rechengitter der Sonde.

Die Berechnungen werden in einem axialsymmetrischen Rechengitter durchgeführt. In axialer Richtung wird die Erde in gleiche Teile der Länge dl aufgeteilt.

Das Rechengitter in radialer Richtung ist variabel. Es wird durch den Gitterfaktor f definiert:

$$Gitterfaktor \quad f = \frac{r_{j+1} - r_j}{r_j - r_{j-1}} \qquad \text{Gl. 6.1}$$

Bei Vorgabe des Simulationsgebietes mit dem grössten Rechenradius r_m kann das Gitter wie folgt berechnet werden, wobei m die Anzahl Rechenknoten in radialer Richtung darstellt:

$$r_0 = \frac{D_i}{2} \qquad \text{Gl. 6.2}$$

$$r_1 = \frac{D_b}{2} = \frac{Bohrdurchmesser}{2} \qquad \text{Gl. 6.3}$$

$$für \quad j \geq 2: \quad r_j = r_{j-1} + (r_m - r_1)\,\frac{1-f}{1-f^{m-1}}\,f^{j-2} \qquad \text{Gl. 6.4}$$

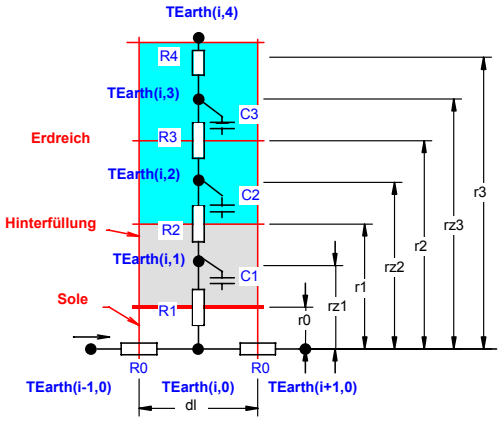


Abb. 6.2 Rechengitter der Sonde.

Ein Gitterfaktor von 2 verdoppelt jeweils die Radius-Differenz zwischen zwei Rechenvolumen.

Der für die Bestimmung der thermischen Widerstände wichtige „Massenschwerpunkt“ kann wie folgt berechnet werden:

$$Def: \quad rz_j = \sqrt{\frac{(r_j^2 + r_{j-1}^2)}{2}} \qquad \text{Gl. 6.5}$$

6.3 Wärmeleitungsgleichung und Sprungantwort g

6.3.1 Wärmeleitungsgleichung

Für die nachfolgenden Betrachtungen wird vorausgesetzt, dass der dominante Wärmetransportmechanismus im Erdreich die Wärmeleitung ist, der konvektive Wärmetransport durch Wasserbewegungen im Erdreich also vernachlässigt werden kann. Das Problem der Wärmeleitung im Erdreich um eine Erdwärmesonde ist axialsymmetrisch. In Axialkoordinaten kann die Wärmeleitungsgleichung um eine Erdwärmesonde in radialer Richtung geschrieben werden als

$$\frac{1}{a}\cdot\frac{\partial T_{Earth}}{\partial t}=\frac{\partial^2 T_{Earth}}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T_{Earth}}{\partial r} \qquad \text{Gl. 6.6}$$

wobei die Temperaturleitfähigkeit a definiert ist durch

$$\text{Def:}\quad a=\frac{\lambda}{cp_{Earth}\cdot\rho_{Earth}} \qquad \text{Gl. 6.7}$$

Die Wärmeleitungsgleichung ist linear, so dass sowohl Einzelsonden, als auch Sondenfelder bei geometrischer Ähnlichkeit ähnliche Temperatur-Sprungantworten aufweisen. Diese Ähnlichkeit bezieht sich auf alle Temperaturen im Erdreich für alle Radien r um die Erdwärmesonden und für alle Zeiten t.

Bei einem Wärmeentzug aus einer Erdwärmesonde entsteht so im Erdreich eine Temperaturabsenkung ΔT_{Earth} gegenüber der unbeeinflussten Erdreichtemperatur (=Temperaturtrichter), die sich mit fortlaufendem Entzug radial ausweitet. Diese Temperaturabsenkung ΔT_{Earth} kann mit der spezifischen Entzugsleistung $\dot{q}$ und der Wärmeleitfähigkeit λ_{Earth} dimensionsbefreit werden:

$$\text{Def:}\quad g(r,t)=\frac{\Delta T_{Earth}(r,t)\,2\pi\,\lambda_{Earth}}{\dot{q}} \qquad \text{Gl. 6.8}$$

6.3.2 Der radiale Temperatur-Trichter

Im stationären Fall ist der radiale Wärmefluss $\dot{q}$ im Sonden-Nahbereich konstant und es gilt

$$\frac{\dot{q}}{2\cdot\pi\cdot r}=\frac{\partial T_{Earth}}{\partial r}\cdot\lambda_{Earth}=\frac{\partial g}{\partial r}\cdot\frac{\dot{q}}{2\cdot\pi} \qquad \text{Gl. 6.9}$$

Durch Integration von r bis r_1 wird daraus

$$g(r)=g(r_1)-\ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \qquad \text{Gl. 6.10}$$

Diese Beziehung erlaubt es, mit einer einzigen Sprungantwort g das Temperaturverhalten im ganzen Sonden-Nahbereich abzuschätzen und bei bekannter Sprungantwort g an der Stelle r_1 auf die Sprungantwort g an der Stelle r zu schliessen. Zu beachten ist dabei allerdings, dass für kleine Zeitschritte t die Annahme eines stationären Falles zu grösseren Abweichungen führt.

6.3.3 Dimensionslose Temperatursprungantwort g

Carslaw & Jaeger [1] haben die Wärmeleitungsgleichung für eine unendliche Linienquelle analytisch gelöst und haben für g die folgenden Beziehung gefunden:

$$g = \frac{1}{2}\cdot\left[-\gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4\cdot t\cdot a}\right) - \sum_{n=1}^{\infty}(-1)^n \frac{\left(\frac{r^2}{4\cdot a\cdot t}\right)^n}{n\cdot n!}\right] \cong \frac{1}{2}\cdot\left[\ln\left(\frac{4\cdot t\cdot a}{r^2}\right) - \gamma\right] \qquad \text{Gl. 6.11}$$

wobei γ=0.5772.. die Eulerkonstant ist.

Werner, A.; Bigler, R.; Niederhauser, A. et. al. [18] sind durch eine Analogie, abgeleitet aus der Brunnengleichung, auf die identische Lösung gekommen. Im Programm-Modul EWS ist Gl. 6.11 eingebaut und diese kann wahlweise, als Alternative zur g-Funktion von Eskilson, als äussere Randbedingung für das Simulationsgebiet ausgewählt werden.

Da bei einer unendlichen Linienquelle aus Gründen der Symmetrie das Nachströmen von Wärme weder von oben noch von unten möglich ist, führt der Ansatz von Carslaw und Jaeger zu einer stetigen Vergrösserung des Temperaturtrichters, ein Gleichgewichtszustand ist mit diesem Ansatz nicht möglich. Da aber untiefe Erdwärmesonden primär die im Sommer von der Erdoberfläche ins Erdreich gespeicherte Wärme nutzen, wurde an der Universität Lund ein Ansatz für Erdwärmesonden mit der endlichen Sondenlänge H entwickelt.

Nach Claesson und Eskilson [2] besitzen Erdwärmesonden eine Zeitkonstante t_s, mit der das zeitliche Verhalten des Erdreichs um die Erdwärmesonden dimensionsbefreit werden kann:

$$t_s = \frac{H^2}{9a} \qquad \text{Gl. 6.12}$$

Die dimensionslose Zahl Es von Eskilson

$$Es = \frac{t}{t_s} = \frac{9a}{H^2}t \qquad \text{Gl. 6.13}$$

kann somit als dimensionslose Zeit für Sondenfelder und Einzelsonden betrachtet werden. Die Herleitung der Eskilsonzahl Es aus der Wärmeleitungsgleichung Gl. 6.6 ist z.B. bei Loose (2007) zu finden.

Die Kenntnis der Zeitkonstanten ist vor allem bei nicht ausgeglichener jährlicher Entzugsbilanz wesentlich. Bis zum Zeitpunkt Es = 0.1 muss mit einer merklichen Abkühlung bzw. Erwärmung des Erdreiches gerechnet werden. Danach erfolgt nur noch eine sehr geringe Temperaturänderung im Erdreich. Der Gleichgewichtszustand zwischen Wärmeentzug und nachhaltigem Nachfliessen der Wärme ist dann ab ca. Es = 10 erreicht.

Die dimensionslose Temperatursprungantwort g (="g-function") ist nach Eskilson (1987) sowohl für Einzelsonden als auch für Sondenfelder einzig eine Funktion der dimensionslosen Zeit *Es* und des dimensionslosen Sondenabstandes r_b/H. Man geht dabei von einem konstanten, spezifischen Wärmeentzug pro Sondenlänge $\dot{q}$ aus.

Für eine Einzelsonde im Bereich 5 $r_1^2/a < t < t_s$ kann die Funktion g bei einem maximalen Fehler von 7 % angenähert werden mit

$$g(t, r_1) = \ln(\frac{H}{2r_1}) + 0.5 \ln(Es) \qquad \text{Gl. 6.14}$$

Für Zeiten grösser als t_s strebt die Einzelsonde dem folgenden Gleichgewichtszustand zu:

$$g(r_1) = \ln(\frac{H}{2 \cdot r_1}) \qquad \text{Gl. 6.15}$$

In Abb. 6.3 sind als Beispiel die dimensionslosen Temperatur-Sprungantworten g von zwei Erdwärmesonden im Abstand B eingezeichnet. Im Vergleich dazu ist gestrichelt die g-function einer Einzelsonde dargestellt. Weitere Temperatur-Sprungantworten für verschiedene Erdwärmesondenfelder sind in Abb. 6.4 zu finden.

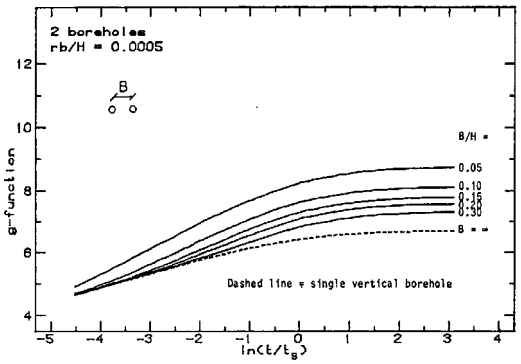


Abb. 6.3 Dimensionslose Sprungantwort g für 2 Erdwärmesonden mit Abstand B nach [3].

6.3.4 Vergleich der Modelle

In Abb. 6.4 werden die Ansatze von Carslaw & Jaeger für eine unendlich tiefe Erdwärmesonde mit dem Ansatz von Eskilson für je eine 10m, 100m und 500m tiefe Erdwärmesonde verglichen. Bis zum Erreichen der Zeitkonstante t_s ist zwischen den Modellen keine Abweichung festzustellen.

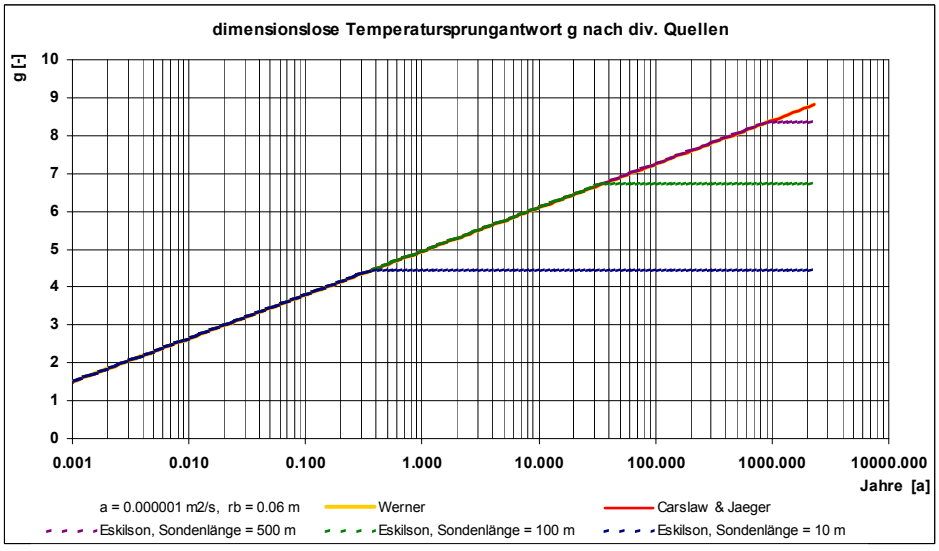

dimensionslose Temperatursprungantwort g nach div. Quellen
g [-]
Jahre [a]
a = 0.000001 m2/s, rb = 0.06 m
Werner
Carslaw & Jaeger
Eskilson, Sondenlänge = 500 m
Eskilson, Sondenlänge = 100 m
Eskilson, Sondenlänge = 10 m

Abb. 6.4 Dimensionslose Sprungantwort g nach Carslaw & Jaeger [1] und Eskilson [3].

6.4 Die Berechnung der g-functions mit dem Superpositionsprinzip

Die einzelnen Sonden eines Sondenfeldes werden meist von einem Sondenverteiler mit der gleichen Rücklauftemperatur im Sondenfluid bedient. Dies bedeutet, dass alle Erdwärmesonden parallel an die Last angehängt sind. In diesem Fall kann die g-function eines Sondenfeldes angenähert aus der Überlagerung (Superposition) von verschiedenen Einzelsonden berechnet werden. Da im Programm EWS die g-functions lediglich als äussere Randbedingungen für das Simulationsgebiet benutz werden und im Regelfall nur einmal pro Woche neu berechnet werden, brauchen wir uns über den Fehler bei kürzeren Zeitschritten (instationäre Effekte) keine Gedanken zu machen. Mit genügender Genauigkeit kann deshalb die stationäre Gleichung Gl. 6.10 verwendet werden, um den Einfluss des Sondenfeldes auf eine beliebige Sonde x im Sondenfeld abzuschätzen. Anstelle von r_1 wird der Sondenabstand A_{xy} zwischen der Sonde x und y eingesetzt:

$$g_x(r) = g(r_1) - \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) + \sum_{y=1}^{y=n/x<>y}\left(g(r_1) - \ln\left(\frac{A_{xy}}{r_1}\right)\right) \qquad \text{Gl. 6.16}$$

Bei parallelem Sondenbetrieb kann dann die g-function des ganzen Sondenfeldes als Durchschnittswert der n Einzelsonden berechnet werden mit

$$g(r) = g(r_1) - \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) + \frac{1}{n}\cdot\sum_{x=1}^{x=n}\left[\sum_{y=1}^{y=n/x<>y}\left(g(r_1) - \ln\left(\frac{A_{xy}}{r_1}\right)\right)\right] \qquad \text{Gl. 6.17}$$

6.5 Die Berücksichtigung von Nachbarsonden

In der Pro-Version des Programms EWS gibt es neu die Möglichkeit, Nachbarsonden zu berücksichtigen. Dabei geht das Programm EWS davon aus, dass Nachbarsonden thermisch gleich belastet sind wie Erdwärmesonden des Projektes selbst und auch die gleiche Bohrtiefe aufweisen. Unter diesen Annahmen wird die g-function g(r) unter der Berücksichtigung der Nachbarsonden zu

$$g(r) = g(r_1) - \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) + \frac{1}{n-m}\cdot\sum_{x=1}^{x=n/x\neq Nachbar}\left[\sum_{y=1}^{y=n/x<>y}\left(g(r_1) - \ln\left(\frac{A_{xy}}{r_1}\right)\right)\right] \qquad \text{Gl. 6.18}$$

wobei n die Anzahl aller Erdwärmesonden (Projektsonden + Nachbarsonden) und m die Anzahl der Nachbarsonden (die nicht zum Projekt gehören) darstellen. Dies bedeutet also, dass die g-functions der einzelnen Sonden, unter Berücksichtigung aller Sonden (Projektsonden und Nachbarsonden) wie in einem grossen Sondenfeld gemäss Gl. 6.16 berechnet werden und dann der arithmetische Mittelwert aller Projektsonden gebildet wird.

Dieses Konzept der Berücksichtigung von Nachbarsonden ist zwar recht vereinfachend. In der Praxis zeigt es sich aber häufig, dass auch Nachbarsonden nach den gleichen Kriterien ausgelegt werden, wie die Projektsonden, da der Auslegung der Sonden meist die gleichen Normen, Richtlinien und gesetzlichen Randbedingungen als Grundlage dienten. Die zeitliche Abfolge der Projekt-Realisationen führt jedoch dazu, dass die älteren Projekte die nachfolgenden Projekte nicht antizipierten und die Bohrtiefen damit eher zu gering ausgelegt sind. In diesem Sinne dürfte die Gl. 6.18 eher zu optimistischen Resultaten führen. Sehr gut geeignet ist die Gl. 6.18 für Quartierplanungen und zur Berechnung von künftigen, gesetzlichen Anforderungen zur Berücksichtigung von Nachbarsonden über die Grundstückgrenzen hinweg.

6.6 Geothermischer Wärmefluss und Temperaturgradient

Die Wärmeleitungsgleichung, in der Form des Fourierschen Gesetzes geschrieben, sieht für den geothermischen Wärmefluss $\dot{q}_{geo}$ aus dem Erdinnern im stationären Zustand wie folgt aus:

$$\dot{q}_{geo} = \lambda \cdot \Delta T_{geo} \quad [W/m^2] \qquad \text{Gl. 6.19}$$

wobei ΔT_{geo} der Temperaturgradient in die Tiefe und λ die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins darstellt. In der äusseren Erdkruste ist im ebenen Gelände und stationären Fall der geothermische Wärmefluss über die Tiefe angenähert konstant, der Temperaturgradient aber schwankt mit der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins. Je grösser die Wärmeleitfähigkeit ist, um so geringer ist auch der geothermische Gradient. Grundwasserströmungen und Topografie (Berge, Täler) können dazu führen, dass $\dot{q}_{geo}$ über die Tiefe nicht konstant ist [13].

6.7 Die Bohrlochtemperatur T_b und die Fluidtemperatur T_f

Um die Temperatur im Erdreich zu erhalten, kann nun die Temperatur-Sprungantwort ΔT von der ungestörten Anfangstemperatur T_m abgezählt werden (Superpositionsprinzip). Die Temperatur am Bohrlochrand $T_{Earth}(r_1)$ (=Bohrlochtemperatur T_b) kann aus g und T_m berechnet werden mit

$$T_b(z) = T_m(z) - R_g \cdot \dot{q} = T_m(z) - \frac{\dot{q}}{2\,\pi\,\lambda_{Earth}}\, g(t, r_1) \qquad \text{Gl. 6.20}$$

T_m ist die mittlere Erdtemperatur im ungestörten Zustand in der Tiefe z. Sie berechnet sich aus der durchschnittlichen Jahres-Erdoberflächentemperatur T_{mo} und dem Temperaturgradienten $\Delta T_{Grad.}$

Der spezifische Wärmeentzug $\dot{q}$ wird im Programm EWS bestimmt durch den Wärmeentzug aus den Erdwärmesonden $\dot{Q}_{Sonden}$, minus allfällig nachfliessender Wärme durch Grundwasser $\dot{Q}_{GW}$ und Gebäudeeinfluss $\dot{Q}_{Gebäude}$, dividiert durch die Bohrtiefe H und die Anzahl Erdwärmesonden n.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}_{Sonden} - \dot{Q}_{GW} - \dot{Q}_{Gebäude}}{n \cdot H} \qquad \text{Gl. 6.21}$$

Die Wärmeleistung des Grundwassers $\dot{Q}_{GW}$ wird dabei gemäss Gl. 6.42 berechnet.

Die durchschnittliche Jahres-Erdoberflächentemperatur T_{mo} ist gleich der durchschnittlichen Lufttemperatur plus einer mittleren Bodenerwärmung die typisch zwischen 0.8 bis 2°C liegt, der Temperaturgradient ΔT_{Grad} schwankt in der Schweiz typischerweise zwischen 0.025 bis 0.045 K/m.

Die über die Bohrtiefe gemittelte Bohrlochtemperatur $\overline{T_b}$ ist definiert als

$$\text{Def} \quad \overline{T_b} = \frac{1}{H} \cdot \int_0^H T_b(z) \cdot dz \qquad \text{Gl. 6.22}$$

Für den Fall eines konstanten Wärmeentzugs pro Bohrlänge $\dot{q}$ kann die über die Tiefe im Bohrloch gemittelte Bohrlochtemperatur $\overline{T_b}$ berechnet werden mit

$$\overline{T_b} = \overline{T_m} - R_g \cdot \dot{q} = \overline{T_m} - \frac{\dot{q}}{2\,\pi\,\lambda_{Earth}}\, g(t, r_1) \qquad \text{Gl. 6.23}$$

wobei

$$\overline{T_m} = T_{mo} - \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} \qquad \text{Gl. 6.24}$$

6.7.1 Die Fluidtemperatur T_f

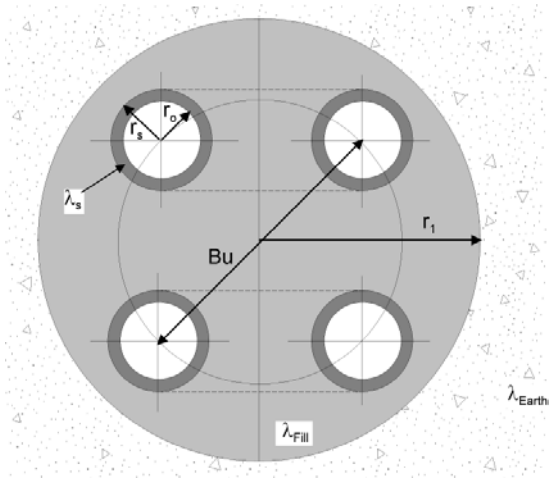
Die mittlere Fluidtemperatur T_f ist definiert als der arithmetische Mittelwert des nach unten und des nach oben strömenden Sondenfluids

$$\text{Def:} \quad T_f(z) = \frac{T_{up}(z) + T_{down}(z)}{2} \qquad \text{Gl. 6.25}$$

Die Fluidtemperatur T_f ist also eine Funktion der Tiefe z im Bohrloch. Die mittlere Fluidtemperatur $\overline{T_f}$ ist definiert als

$$\text{Def:} \quad \overline{T_f} = \frac{1}{2} \cdot \left(T_{Quelle} + T_{Rücklauf}\right) \qquad \text{Gl. 6.26}$$

6.8 Thermische Widerstände Ra und Rb in der Doppel-U-Sonde



Eine idealisierte Doppel-U-Sonde mit dem Bohrradius r_1 und mit den 4 Sondenrohren (mit Innenradius r_o und Aussenradius r_s) ist auf nebenstehendem Bild zu sehen. In je 2 Sondenrohren fliesst das Sondenfluid nach unten und nach oben. Die Hinterfüllung besitzt die Wärmeleitfähigkeit λ_{Fill}, die Sondenrohre λ_s und das umgebende Erdreich λ_{Earth}. Die genaue Lage der 4 Sondenrohre in der Bohrung kann definiert werden mit der Exzentrizität b

$$b = \frac{Bu}{2 \cdot r_1} \qquad \text{Gl. 6.27}$$

Abb. 6.5Bezeichnungen an der Doppel-U-Sonde.

Die Exzentrizität b ist mit dem Rohrabstand Bu („shank spacing“) gemäss Abb. 6.5 definiert. Die geometrisch maximal mögliche Exzentrizität b_{Max} beträgt:

$$b_{Max} = \frac{2 \cdot r_1 - 2 \cdot r_s}{2 \cdot r_1} = 1 - \frac{r_s}{r_1} \qquad \text{Gl. 6.28}$$

Die geometrisch minimale Exzentrizität b_{Min} (bei einem nicht zentrierten Füllrohr) beträgt:

$$b_{Min} = \frac{r_s}{r_1} \qquad \text{Gl. 6.29}$$

Als reine Stoffgrösse wird der Konduktivitätsparameter σ definiert mit

$$\sigma = \frac{\lambda_{Fill} - \lambda_{Earth}}{\lambda_{Fill} + \lambda_{Earth}} \qquad \text{Gl. 6.30}$$

Der interne thermische Bohrlochwiderstand R_a [Km/W] ist eine charakteristische Grösse für die längenbezogenen, thermischen „Verluste“ Δq_i [W/m] des heraufströmenden Fluids an das nach unten strömende Fluid und ist unabhängig von der Tiefe im Bohrloch:

$$\text{Def:} \quad R_a = \frac{T_{up}(z) - T_{down}(z)}{\Delta q_i(z)} \qquad \text{Gl. 6.31}$$

Mit der mittleren Fluidtemperatur T_f in der Sonde und der Bohrlochtemperatur T_b kann der thermische Bohrlochwiderstand R_b definiert werden als

$$\text{Def:} \quad R_b = \frac{T_b(z) - T_f(z)}{\dot{q}} \qquad \text{Gl. 6.32}$$

Der Bohrlochwiderstand R_b ist unabhängig von der Tiefe im Bohrloch und setzt sich zusammen aus dem Bohrloch-Hinterfüllungswiderstand R_c und dem Wärmeübergangswiderstand R_α von der Hinterfüllung ans Sondenfluid:

$$R_b = R_\alpha + R_c \qquad \text{Gl. 6.33}$$

Bei Doppel-U-Sonden kann der Wärmeübergangswiderstand R_α berechnet werden mit

$$R_\alpha = \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot r_o} \qquad \text{Gl. 6.34}$$

6.8.1 Internen Bohrlochwiderstandes R_a nach Hellström [4]

Nach Hellström [4] (1991, S. 147, Formel 9.149) kann der interne Bohrlochwiderstand R_a für Doppel-U-Sonden mit symmetrischer Sondenrohr-Anordnung berechnet werden mit

$$R_a = \frac{1}{\pi \cdot \lambda_{Fill}} \left[\ln\left(\frac{\sqrt{2} \cdot b \cdot r_1}{r_o} \right) - \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot b \cdot r_1}{r_o} \right) - \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot \ln\left(\frac{1 - b^4}{1 + b^4} \right) \right] + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot \alpha} + R_s \qquad \text{Gl. 6.35}$$

wobei R_s der thermischer Widerstand der Sondenrohr-Wand ist, der berechnet wird mit

$$R_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_s} \cdot \ln\left(\frac{r_s}{r_o} \right) \qquad \text{Gl. 6.36}$$

6.8.2 Bohrlochwiderstandes R_b nach Hellström [4]

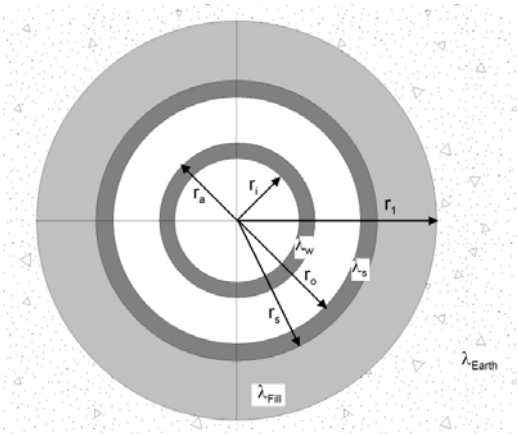
Für eine Doppel-U-Sonde kann nach Hellström [4] (S. 89, Formel 8.69) der Bohrlochwiderstand R_b berechnet werden mit

$$R_b = \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot \lambda_{Fill}} \cdot \left[\beta + \ln\left(\frac{r_1}{r_o} \right) + \ln\left(\frac{r_1}{Bu} \right) + \sigma \cdot \ln\left(\frac{r_1^4}{r_1^4 - \frac{Bu^4}{16}} \right) - \frac{\frac{r_o^2}{Bu^2} \left[1 - \sigma \cdot \frac{\frac{1}{4} Bu^4}{(r_1^4 - \frac{Bu^4}{16})} \right]^2}{\left\{ \frac{1+\beta}{1-\beta} + \frac{r_o^2}{Bu^2} \left[1 + \sigma \cdot \frac{Bu^4 \cdot r_1^4}{\left(r_1^4 - \frac{Bu^4}{16} \right)^2} \right] \right\}} \right] \qquad \text{Gl. 6.37}$$

und

$$\beta = 2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Fill} \cdot \left[R_\alpha + R_w \right] = \lambda_{Fill} \cdot \left[\frac{1}{r_o \cdot \alpha} + \frac{1}{\lambda_s} \cdot \ln\left(\frac{r_s}{r_o} \right) \right] \qquad \text{Gl. 6.38}$$

6.9 Thermische Widerstände Ra / Rb an der Koaxialsonde



Bezeichnungen an der Koaxialsonde

Eine idealisierte Koaxialsonde ist in Abb. 6.6 dargestellt. Grau dargestellt ist die Bohrung mit dem Bohrradius r_1.

Die Hinterfüllung besitzt die Wärmeleitfähigkeit λ_{Fill}, das innere Sondenrohr λ_w, das äussere Sondenrohr λ_s und das Erdreich λ_{Earth}.

r_i und r_a sind die inneren und äusseren Radien des inneren Sondenrohres, r_o und r_s die inneren und äusseren Radien des äusseren Sondenrohres.

Abb. 6.6Bezeichnungen an der Koaxialsonde.

6.9.1 Modellierung des internen Bohrlochwiderstandes R_a

Auch für Koaxialsonden gilt die Definition für den internen Bohrlochwiderstand R_a nach Gl. 6.31. Der thermische Widerstand R_a ist somit die Summe aus dem Wärmeübergangswiderstand vom hinaufströmende Fluid ans Innenrohr, dem thermischen Widerstand des Innenrohrs und dem Wärmeübergangswiderstand vom Innenrohr ans hinabströmenden Fluid:

$$R_a = \left[\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot \alpha_i} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_w} \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_a \cdot \alpha_a} \right] \qquad \text{Gl. 6.39}$$

6.9.2 Modellierung des Bohrlochwiderstandes R_b

Bei der Koaxialsonde ist R_b definiert als der thermische Widerstand des äusseren Sondenfluids (in der Regel das hinabströmende Fluid) bis an die Wand des Bohrlochs (beim Radius r_1):

$$R_b = \left[\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot \alpha_o} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_s} \cdot \ln\left(\frac{r_s}{r_o}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Fill}} \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_s}\right) \right] \qquad \text{Gl. 6.40}$$

6.10 Wärmeleistung der Grundwasserströmung

Gemäss dem Darcy-Gesetz ist der spezifische Durchfluss v_f (=Darcy-Geschwindigkeit) das Produkt aus der hydraulischen Leitfähigkeit k_f und dem Druckgradienten i des Grundwassers:

$$v_f = k_f \cdot i \qquad \text{Gl. 6.41}$$

Geht man davon aus, dass das zuströmende Grundwasser die Temperatur des unbeeinflussten Erdreiches in der entsprechenden Tiefe hat, wird die zugeführte Wärmeleistung durch das Grundwasser über den Strömungsquerschnitt A_{GW} aus dem Temperaturtrichter ΔT (Abkühlung der Erde bei Sondenbetrieb gegenüber dem unbeeinflussten Erdreich) wie folgt berechnet:

$$\dot{Q}_{GW} = v_f \cdot A_{GW} \cdot cp_{Wasser} \cdot \rho_{Wasser} \cdot \Delta T \qquad \text{Gl. 6.42}$$

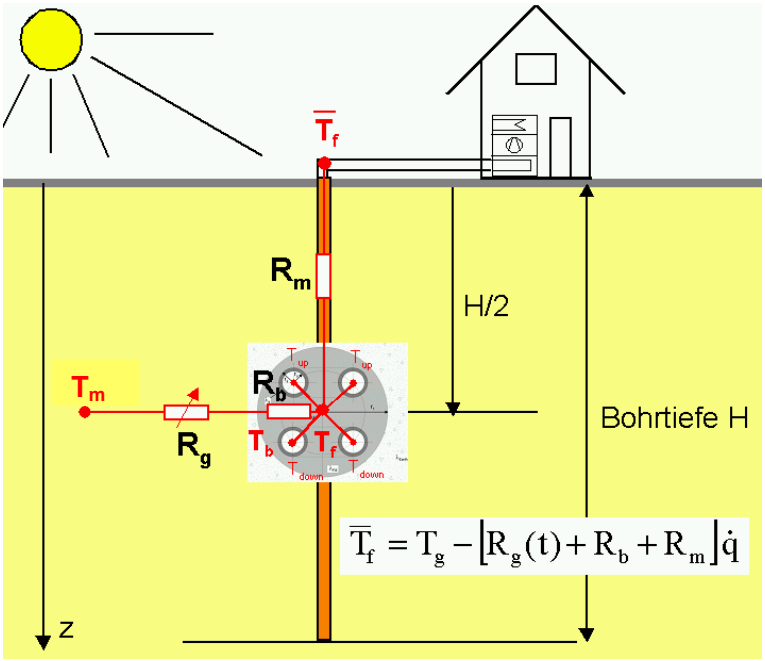
6.11 Analytische Erdsondengleichung

6.11.1 Konzept der thermischen Widerstände

Das Konzept der thermischen Widerstände geht von einem quasi-stationären Zustand aus und postuliert einen linearen Zusammenhang zwischen Temperaturgradient und spez. Wärmeentzug:

$$T_{Nutzer} - T_{Wärmequelle} \equiv \sum R \cdot \dot{q} \qquad \text{Gl. 6.43}$$

Für Erdwärmesonden können die thermischen Widerstände wie folgt aufgeteilt werden:



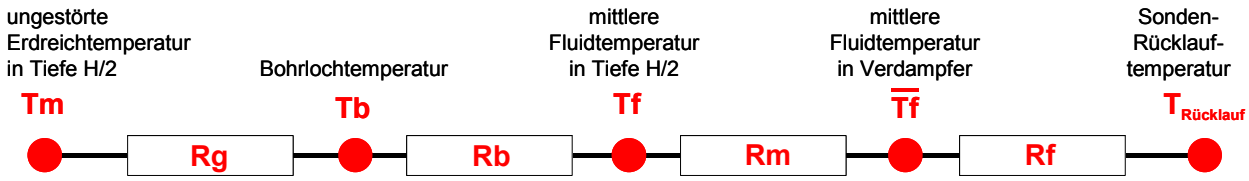


Abb. 6.7: Thermische Widerstände in einer Erdwärmesonde

6.11.2 thermische Verbraucherwiderstand R_f

Die Bilanz über dem Wärmebezüger oder Verdampfer kann wie folgt aufgestellt werden:

$$\left(T_{Quelle} - T_{Rücklauf}\right) \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole} = \dot{Q}_{Verdampfer} = \dot{Q}_{Sonde} = \quad H \cdot \dot{q} \qquad \text{Gl. 6.44}$$

Mit Gl. 6.26 kann daraus der ***thermische Verbraucherwiderstand R_f*** wie folgt definiert werden:

$$T_{Quelle} = \overline{T}_f + \frac{H}{2 \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole}} \dot{q} \quad \equiv \quad \overline{T}_f + R_f \cdot \dot{q} \qquad \text{Gl. 6.45}$$

$$T_{Rücklauf} = \overline{T}_f - \frac{H}{2 \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole}} \dot{q} \quad \equiv \quad \overline{T}_f - R_f \cdot \dot{q} \qquad \text{Gl. 6.46}$$

6.11.3 Thermischer Transportwiderstand R_m

Im Wärmeentzugsfall liegt die höchste, mittlere Fluid-Temperatur T_f im Sondenfuss. Beim Transport nach oben verliert das Sondenfluid durch Wärmeabgabe an das hinunterfliessende Fluid und unter Umständen auch oben ans Erdreich wieder ein Teil dieses Temperaturniveaus. Unter der Annahme einer konstanten, spezifischen Entzugsleistung $\dot{q}$ über die ganze Sondenlänge (für die meisten Sondenbetriebe eine durchaus brauchbare Annahme) erhält man für die Fluidtemperatur in der Sonde die folgende Beziehung (Herleitung in [8]):

$$T_{up}(z) = T_{mo} + \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} - \left[\frac{g(t,H)}{2\pi\,\lambda_{Earth}} + R_b + \frac{1}{R_a} \cdot \frac{\frac{H^2}{3} - z \cdot H + \frac{z^2}{2}}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}^{\,2}} - \frac{H - z}{2 \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole}} \right] \dot{q} \qquad \text{Gl. 6.47}$$

$$T_{down}(z) = T_{mo} + \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} - \left[\frac{g(t,H)}{2\pi\,\lambda_{Earth}} + R_b + \frac{1}{R_a} \cdot \frac{\frac{H^2}{3} - z \cdot H + \frac{z^2}{2}}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}^{\,2}} + \frac{H - z}{2 \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole}} \right] \dot{q} \qquad \text{Gl. 6.48}$$

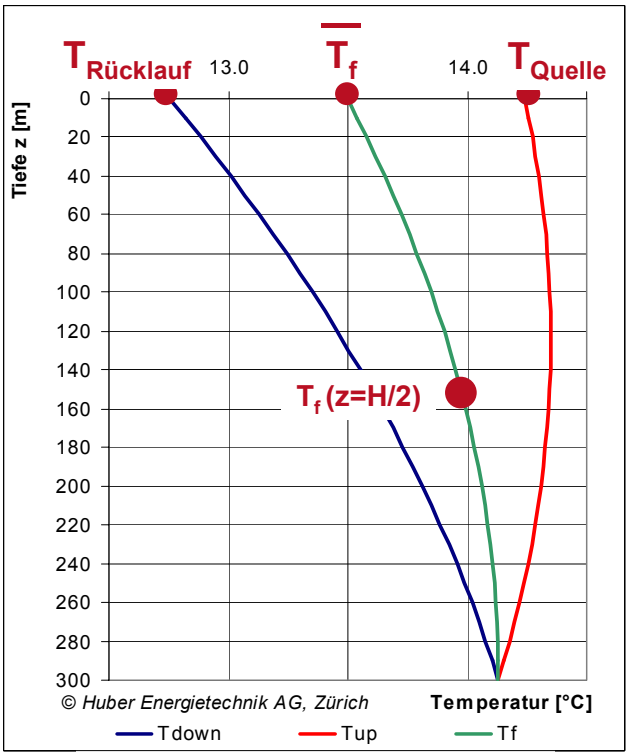


Abb. 6.8: ***Temperaturverlauf im Sondenfluid nach [8]***

Damit kann der ***thermische Transportwiderstand R_m*** definiert werden als

$$T_f\left(z = \frac{H}{2}\right) - \overline{T}_f \equiv R_m \cdot \dot{q} = \left(\frac{1}{3 \cdot R_a} \cdot \frac{H^2}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}^{\,2}} \right) \cdot \dot{q} \qquad \text{Gl. 6.49}$$

6.11.4 Wärmewiderstand des Bodens R_g

Der Wärmewiderstand des Bodens R_g ergibt sich aus der Temperaturdifferenz der Bohrlochoberfläche T_b und dem ungestörten Temperaturniveau in der gleichen Tiefe. Mit der Definition der g-functions (Gl. 6.8) ergibt sich die Definitionsgleichung für R_g:

$$T_m - T_b = \Delta T(r = r_b, t) = \frac{\dot{q}}{2\pi\lambda} \cdot g(r_b, t) = R_g \cdot \dot{q} \qquad \text{Gl. 6.50}$$

Speziell am Wärmewiderstand R_g ist, dass R_g eine Funktion der Zeit ist und sich bei konstantem Entzug ständig vergrössert (cf. Kapitel 6.3).

6.11.5 Analytische Erdwärmesondengleichung

Die analytische Erdwärmesondengleichung erhält man nun durch den Zusammenzug der verschiednen, addierbaren Widerstände an der Erdwärmesonde:

$$T_{Quelle} = T_m - \left(R_g + R_b + R_m - R_f\right) \cdot \dot{q} \qquad \text{Gl. 6.51}$$

$$T_{Rücklauf} = T_m - \left(R_g + R_b + R_m + R_f\right) \cdot \dot{q} \qquad \text{Gl. 6.52}$$

Ersetzt man nun T_m durch Gl. 6.24, R_g durch Gl. 6.50, R_m durch Gl. 6.49 und Rf durch Gl. 6.45, so erhält man die analytische Erdwärmesondengleichung

$$T_{Quelle} = T_{mo} + \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} - \left[\frac{g(t, r_1)}{2\pi\,\lambda_{Earth}} + R_b + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{R_a} \cdot \frac{H^2}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}{}^2} - \frac{H}{2 \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole}}\right] \dot{q} \qquad \text{Gl. 6.53}$$

und

$$T_{Rücklauf} = T_{mo} + \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} - \left[\frac{g(t, r_1)}{2\pi\,\lambda_{Earth}} + R_b + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{R_a} \cdot \frac{H^2}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}{}^2} + \frac{H}{2 \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole}}\right] \dot{q} \qquad \text{Gl. 6.54}$$

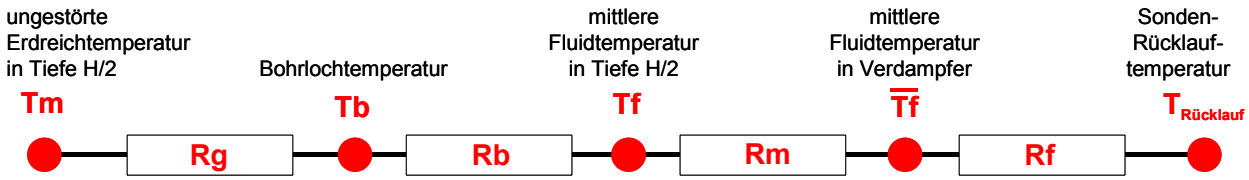


Abb. 6.9: Thermische Widerstände in einer Erdwärmesonde

Für Grössenordnungsabschätzung und Plausibilisierung von Rechenergebnissen eignet sich die Erdwärmesondengleichung sehr gut.

7 ANHANG B: Eingabe eigener g-functions

7.1 Beispiel 1: Eingabe einer g-function mittels den Funktionswerten

Die von Eskilson [3] publizierte g-function von 9 Sonden in quadratischer Anordnung (cf. Abb. 7.1) für B/H = 0.10 soll als eigene g-function eingegeben werden. Die Sondenlänge H sei 100 m.

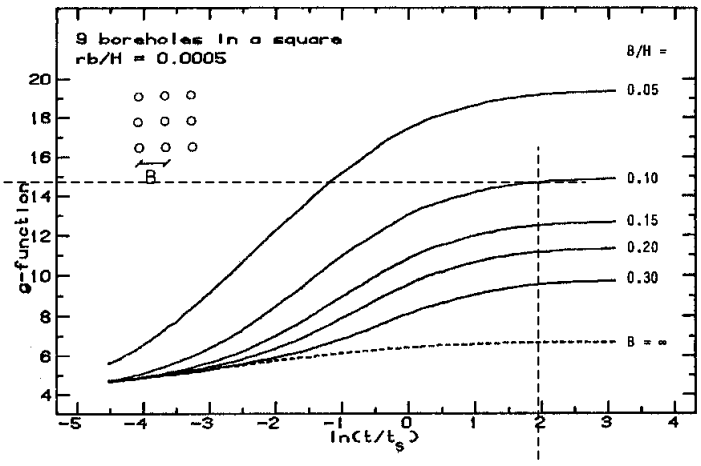


Abb. 7.1: Beispiel einer publizierten g-function (aus [3]) und Auslesen des Funktionswertes an der Stützstelle ln(t/ts) = 2.

Im Feld 1.11 wird der letzte Auswahlpunkt „eigene Eingabe“ ausgewählt, dann bei den Feldern 1.10 und 1.13 „ja“ angewählt. Die Funktionswerte der g-function an den Stützstellen ln(t/ts) = -4, -2, 0, +2, +3 werden grafisch ausgelesen. Es ergibt sich: g[ln(t/ts)=-4)] = 5.09, g[ln(t/ts)=-2)] = 7.00, g[ln(t/ts)=0)] = 10.86, g[ln(t/ts)=+2)] = 14.68, g[ln(t/ts)=+3)] = 14.91. Diese Funktionswerte werden eingetragen in die Felder 1.15 bis 1.19. Der Sondenabstand in Feld 1.20 wird so angepasst, dass das B/H-Verhältnis in Feld 1.21 gleich 0.10 wird; d. h. Feld 1.20 muss 10 m betragen (bei einer vorgegebenen Sondenlänge H von 100 m).

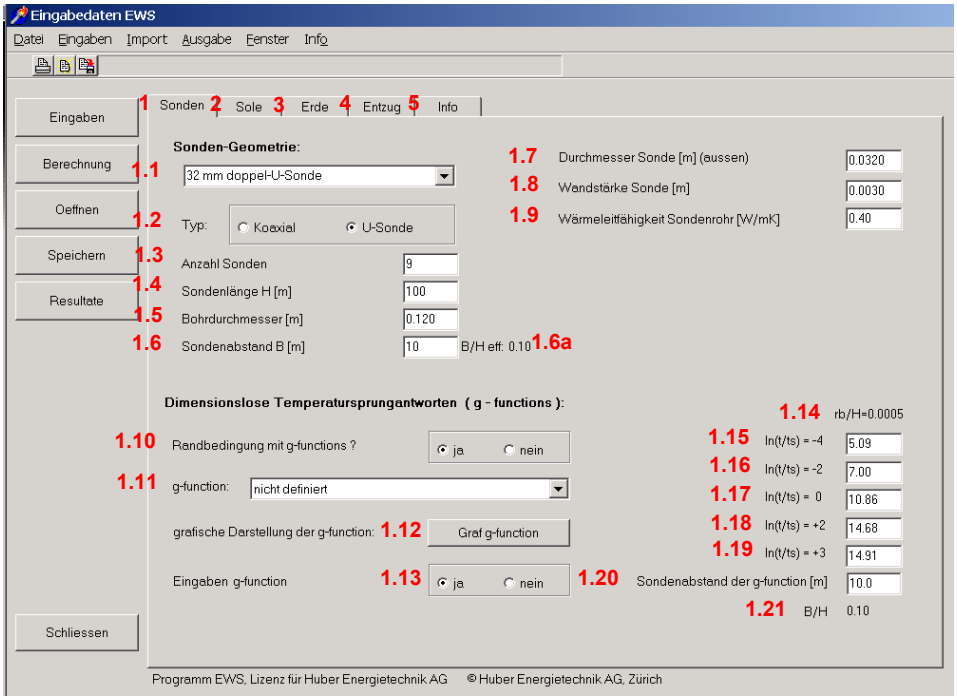

Eingabedaten EWS
Datei Eingaben Import Ausgabe Fenster Info
Eingaben
Berechnung
Oeffnen
Speichern
Resultate
Schliessen
1 Sonden 2 Sole 3 Erde 4 Entzug 5 Info
Sonden-Geometrie:
1.1 32 mm doppel-U-Sonde
1.2 Typ: Koaxial U-Sonde
1.3 Anzahl Sonden 9
1.4 Sondenlänge H [m] 100
1.5 Bohrdurchmesser [m] 0.120
1.6 Sondenabstand B [m] 10 B/H eff: 0.10 1.6a
1.7 Durchmesser Sonde [m] (aussen) 0.0320
1.8 Wandstärke Sonde [m] 0.0030
1.9 Wärmeleitfähigkeit Sondenrohr [W/mK] 0.40
Dimensionslose Temperatursprungantworten (g - functions):
1.10 Randbedingung mit g-functions ? ja nein
1.11 g-function: nicht definiert
grafische Darstellung der g-function: 1.12 Graf g-function
Eingaben g-function 1.13 ja nein
1.14 rb/H=0.0005
1.15 ln(t/ts) = -4 5.09
1.16 ln(t/ts) = -2 7.00
1.17 ln(t/ts) = 0 10.86
1.18 ln(t/ts) = +2 14.68
1.19 ln(t/ts) = +3 14.91
1.20 Sondenabstand der g-function [m] 10.0
1.21 B/H 0.10
Programm EWS, Lizenz für Huber Energietechnik AG © Huber Energietechnik AG, Zürich

Abb. 7.2: Blatt „Sonden“, Beispiel einer selber eingegebenen g-function für 3 x 3 Sonden in quadratischer Anordnung für B/H = 0.10.

Die eingegebene g-function bzw. die vom Programm verwendete Spline-Interpolation kann visuell und quantitativ überprüft werden durch Anwählen des Feldes 1.12. Falls das Verhältnis B/H eff (Feld 1.6a) ungleich dem B/H-Verhältnis der g-function (Feld 1.21) ist, so ist es nötig, vorübergehend das Verhältnis B/H eff (Feld 1.6a) anzupassen auf das B/H-Verhältnis der g-function (Feld 1.21), d.h. der effektive Sondenabstand B (Feld 1.6) muss angepasst werden auf den Wert aus Feld 1.20. (Ansonsten würde durch Anwählen von Feld 1.12 diejenige g-function dargestellt, welche auf das effektive Verhältnis B/H eff extrapoliert ist.) Die grafische Darstellung der eingegebenen g-function ist zu sehen in Abb. 7.3.

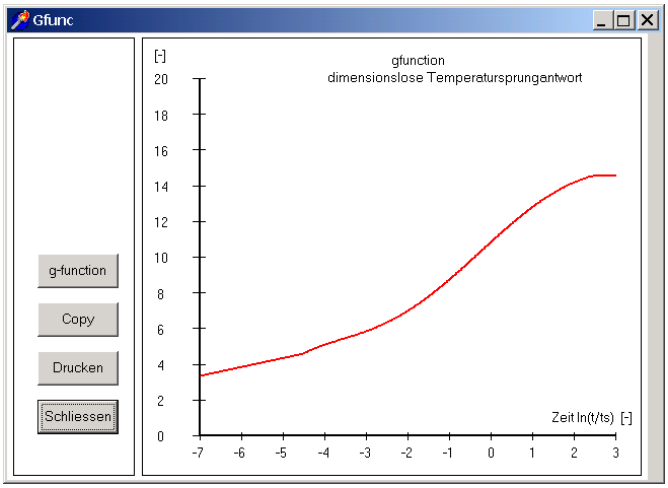


Abb. 7.3: Darstellung der selber eingegebenen g-function aus Abb. 7.2.

Falls nun das effektive Verhältnis B/H eff (Feld 1.6a) von 0.10 abweicht, so wird für die EWS-Berechnung vom Programm eine automatisch extrapolierte g-function verwendet. Diese extrapolierte g-function kann durch Anwählen von Feld 1.12 angezeigt werden. Wenn also im obigen Beispiel der effektive Sondenabstand B 8 m beträgt, wird dieser Wert in Feld 1.6 eingegeben. Das effektive Verhältnis B/H eff ist somit 0.08. Die extrapolierte g-function (erzeugt mittels Feld 1.12) ist in Abb. 7.4 dargestellt.

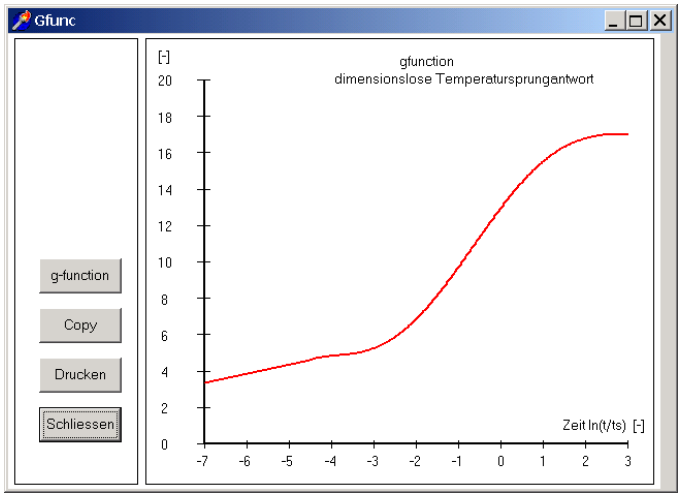


Abb. 7.4: Darstellung der g-function aus Abb. 7.2 extrapoliert auf B/H eff = 0.08.

8 Symbolverzeichnis

8.1 Lateinische Symbole

a	Temperaturleitfähigkeit	[m2/s]
A_{GW}	Strömungsquerschnittsfläche des Grundwassers im Bereich der Erdwärmesonden	[m2]
b	Exzentrizität bei Doppel – U – Sonden	[-]
B	Sondenabstand verschiedener Erdwärmesonden	[m]
Bu	Rohrabstand des hinaufströmenden zum hinunterströmenden Fluid (shank spacing)	[m]
cp_{Sole}	spez. Wärmekapazität des Sondenfluids	[J/(kgK)]
cp_{Wasser}	spez. Wärmekapazität des Grundwassers	[J/(kgK)]
D_i	Innendurchmesser der Sondenrohre	[m]
DimAxi	Anzahl Rechenknoten in axialer Richtung	[-]
DimRad	Anzahl Rechenknoten in radialer Richtung	[-]
Es	dimensionslose Zeit von Eskilson	[–]
f	Gitterfaktor für das Rechengitter in radialer Richtung	[–]
g	dimensionslose Temperatursprungantwort der Erde nach Eskilson	[–]
H	Erdwärmesondenlänge, Bohrtiefe	[m]
i	Druckgradient des Grundwassers	[m/m]
k_f	hydraulische Leitfähigkeit = Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]
$\dot{m}$	Massenstrom, Sondendurchsatz	[kg/s]
m	Anzahl Rechenknoten in radialer Richtung (=DimRad)	[-]
m	Anzahl Nachbarsonden (gehören nicht zum Projektgebiet)	[-]
n	Anzahl Sonden in einem Sondenfeld inkl. der Nachbarsonden	[-]
Nu	Nusseltzahl	[-]
Pr	Prandtlzahl	[-]
Δp	Druckabfall	[Pa]
$\dot{q}$	Spezifische Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonde pro Länge	[W/m]
$\dot{q}_{geo}$	natürlicher, geothermischer Wärmefluss aus dem Erdinnern	[W/m2]
Δq_i	Wärmeverlust vom hinaufströmenden ans hinunterströmende Fluid	[W/m]
$\dot{Q}$	Wärmeleistung	[W]
$\dot{Q}_{GW}$	Wärmeleistung des Grundwasserflusses	[W]
$\dot{Q}_{Gebäude}$	Wärmeeintrag ins Erdreich durch Gebäudeboden über Erdpfählen	[W]
Re	Reynoldszahl	[-]
r_0	Innenradius des Sondenrohres	[m]
r_s	Aussenradius des Sondenrohrs	[m]
r_i	Innenradius des inneren Koaxialrohrs	[m]
r_a	Aussenradius des inneren Koaxialrohrs	[m]
r_1	Bohrradius	[m]
r_b	radialer Abstand von der Sondenachse (Variable)	[m]
R_α	Wärmeübergangswiderstand (vom Fluid zum Sondenrohr)	[Km/W]
R_a	interner Sondenwiderstand (von hinauf- zu hinabströmendem Fluid)	[Km/W]
R_b	thermischer Bohrlochwiderstand (von Fluid - bis Bohrradius) in Tiefe z	[Km/W]
R_c	thermischer Sondenwiderstand (von Sondenrohr- bis Bohrradius)	[Km/W]
R_d	thermischer Kontaktwiderstand (vom Bohrradius bis zur Hinterfüllung)	[Km/W]
R_f	thermischer Verbraucherwiderstand, $(T_{Quelle} - \overline{T_f}) / \dot{q}$	[Km/W]
R_m	thermischer Transportwiderstand zwischen der Tiefe H/2 und der Oberfläche	[Km/W]

St	Stantonzahl	[-]
TRT	Thermal Response Test	
t_a	Periodendauer der Jahreszeitenschwankungen (= 1 Jahr = 8760 h * 3600 s/h)	[s]
$\Delta T(r)$	Abkühlung der Erde um eine Erdwärmesonde gegenüber dem unbeeinflussten Erdreich	[K]
ΔT_{Grad}	Temperaturgradient im unbeeinflussten Erdreich	[K/m]
T_b	Bohrlochtemperatur in Tiefe z (auf dem Radius r_1)	[°C]
$\overline{T_b}$	über die Bohrtiefe gemittelte Bohrlochtemperatur (auf dem Radius r_1)	[°C]
T_f	mittlere Fluidtemperatur in der Tiefe z	[°C]
$\overline{T_f}$	mittlere Fluidtemperatur, ½ (T_{Quelle} + $T_{Rücklauf}$)	[°C]
T_{down}	Temperatur des hinunterströmenden Fluids in der Tiefe z	[°C]
$\overline{T_{Luft}}$	langjährige Mitteltemperatur der Aussenluft	[°C]
T_m	ungestörte Erdreichmitteltemperatur (in der Tiefe z)	[°C]
T_{mo}	Jahresmitteltemperatur der Erdoberfläche	[°C]
T_{Quelle}	Quellentemperatur (Temperatur des ausströmenden Sondenfluids)	[°C]
$T_{Rücklauf}$	Rücklauftemperatur (Temperatur des einströmenden Sondenfluids)	[°C]
T_{up}	Temperatur des hinaufströmenden Fluids in der Tiefe z	[°C]
t_s	Sondenzeitkonstante	[s]
v	Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
v_f	Darcy-Geschwindigkeit = spezifischer Durchfluss = Filtergeschwindigkeit	[m/s]
w	Wandstärke des Innenrohrs bei Koaxialsonden ($r_a - r_i$)	[m]
z	Tiefe im Erdreich, von der Erdoberfläche an gerechnet	[m]

8.2 Griechische Symbole

α	Wärmeübergangskoeffizient des Sondenfluids an die Sonde	[W/(m^{3}K)]
β	dimensionsloser thermischer Widerstand Sondenrohr bis Fluid	[-]
ξ	dimensionsloser Druckverlustkoeffizient (Rohrreibungszahl, oft auch λ)	[-]
γ	Eulerkonstante, 0.5772..	[-]
ν	kinematische Viskosität der Sondenfüllung	[m^2/s]
λ_{Earth}	Wärmeleitfähigkeit der Erde	[W/(mK)]
λ_{eff}	Wärmeleitfähigkeit der Erde mit Grundwassereinfluss (aus TRT)	[W/(mK)]
λ_{real}	Wärmeleitfähigkeit der Erde ohne Grundwassereinfluss	[W/(mK)]
λ_{Fill}	Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung	[W/(mK)]
λ_{isol}	Wärmeleitfähigkeit des isolierten Sondenrohrs	[W/(mK)]
λ_s	Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre	[W/(mK)]
λ_w	Wärmeleitfähigkeit des Innenrohrs bei Koaxialsonden	[W/(mK)]
ρ_{Wasser}	Dichte des Grundwassers	[kg/m3]
σ	Konduktivitätsparameter der Hinterfüllung	[-]

9 Literaturverzeichnis

[1] Carslaw, H.S.; Jaeger, J.C. (1959): **Conduction of heat in solids.** 2nd ed., Oxford Univers. Press, London.

[2] Claesson, J.; Eskilson, P. (1987): **Conductive Heat Extraction by a Deep Borehole. Analytical Studies.** Dep. of Mathematical Physics, University of Lund.

[3] Eskilson, P. (1987): **Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes.** Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden. ISBN 91-7900-298-6

[4] Hellström, G. (1991): **Ground Heat Storage. Thermal Analyses of Duct Storage Systems. Theory.** Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden. ISBN 91-628-0290-9

[5] Huber, A.; Schuler, O. (1997): **Berechnungsmodul für Erdwärmesonden.** Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung. Bundesamt für Energie, Bern. www.hetag.ch.

[6] Huber, A.; Pahud, D. (1999b): **Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder.** Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern. www.hetag.ch.

[7] Huber, A. (1999): **Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen.** Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern. www.hetag.ch.

[8] Huber, A. (2005): **Erdwärmesonden für Direktheizung. Phase 1: Modellbildung und Simulation.** Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern. www.hetag.ch.

[9] Huber, A.; Stalder, M. (2015): **Rechenmethode WPesti. Handbuch mit Beispielen Version 8.1.** EWZ / Energieinstitut Vorarlberg / AWEL / FWS / Verein MINERGIE. www.endk.ch und www.hetag.ch.

[10] Huber, A. (2006): **Planung von gekoppelten Kälte- und Wärme-Erzeugungsanlagen mit Erdwärmesonden.** Weiterbildungskurs 235, Hochschule für Technik+Architektur, Luzern. www.hetag.ch.

[11] Huber, A.; Ochs, M. (2007): **Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen mit der Software „EWSDruck" Vers. 2.0**. Bundesamt für Energie, Bern. www.hetag.ch.

[12] Huber, A. (2010): **Forschungsprojekt Erdsondenoptimierung: Einfluss der Sondenhinterfüllung.** Bundesamt für Energie (BFE), Bern. www.hetag.ch.

[13] Huber, A. (2014): **Bodentemperaturen und geothermischer Wärmefluss in der Schweiz.** Huber Energietechnik AG, Zürich, www.hetag.ch.

[14] Leu, W.; Keller, G.; Mégel, Th.; Schärli, U.; Rybach, L. (1999): **Programm SwEWS-99. Berechnungsprogramm für geothermische Eigenschaften der Schweizer Molasse (0-500m).** Schlussbericht. Bundesamt für Energie, Bern.

[15] Leu, W.; Keller, G.; Matter, A.; Schärli, U.; Rybach, L. (1999): **Geothermische Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich 0-500m).** Bundesamt für Energie, Bern.

[16] Merker, G. (1987): **Konvektive Wärmeübertragung.** Springer-Verlag.

[17] Remund, J.; Kunz, S.; Schilter, Ch. (2008): **METEONORM, Version 6.0. Handbook Part I: Software**. Software version 6.1 of December 15th 2008. METEOTEST, Fabrikstrasse 14, CH-3012 Bern, Switzerland.

[18] Werner, A.; Bigler, R.; Niederhauser, A. et. al. (1996): **Grundlagen für die Nutzung von Wärme aus Boden und Grundwasser im Kanton Bern. Thermoprogramm Erdwärmesonden, Burgdorf.** Schlussbericht. Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kt. Bern (WEA).

[19] Schärli, U.; Rohner, E.; Signorelli, S.; Wagner, R. (2007): **Thermische Leitfähigkeit: Eichung von in-situ Messungen (d.h. „kabellose Temperatursonde") mit Laborbestimmungen als Grundlage für die geothermische Kartierung des Kanton ZH und der umliegenden Kantone.** Bundesamt für Energie, Bern.

[20] Loose, P. (2009): **Erdwärmenutzung. Versorgungstechnische Planung und Berechnung**. 3. überarbeitete Auflage. ISBN 978-3-7880-7831-7.

[21] **Norm SIA 384/6 (2010): Erdwärmesonden**. SIA Zürich.